

**ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A  
PARTIR DE TRES BIOMASAS RESIDUALES, TRES TIPOS DE  
BIOAGLOMERANTE Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE  
CÓRDOBA**



**CRISTIAN BERAESTEGUI BARRANCO  
JUAN PABLO ORTEGA RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2016**

**ELABORACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A  
PARTIR DE TRES BIOMASAS RESIDUALES, TRES TIPOS DE  
AGLOMERANTE Y CARBÓN MINERAL DEL DEPARTAMENTO DE  
CÓRDOBA.**

**CRISTIAN BERASTEGUI BARRANCO**

**JUAN PABLO ORTEGA RODRÍGUEZ**

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de trabajo de investigación, como  
parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

**Director:**

**YAHIR ENRIQUE GONZALEZ DORIA, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA**

**MONTERÍA, CÓRDOBA**

**2016**

**La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del  
proyecto, serán responsabilidad de los autores.**

**Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

## **DEDICATORIA**

A Dios, que nunca se alejó de mí y me ayudó en los momentos más difíciles.

A mi familia, quienes fueron incondicionales y me apoyaron en todo.

A mis amigos, compañeros y profesores que de alguna u otra forma aportaron su grano de arena para ayudarnos a cumplir esta meta.

### **JUAN PABLO ORTEGA RODRÍGUEZ**

Principalmente a Dios, que me brindo fuerzas y mucho valor para superar este proceso.

Muy especialmente a mis padres que con su apoyo incondicional y su entrega, ayudaron a labrar este camino.

A mi novia, quien a pesar de todos los obstáculos estuvo ahí, respaldándome en cada uno de los momentos coyunturales de esta etapa.

A mis amigos, compañeros, profesores y demás personas que junto a mí, recorrieron este sendero.

### **CRISTIAN BERAATEGUI BARRANCO**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimiento especial al departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad De Córdoba y a cada una de las personas que lo constituyen, por su ayuda a nuestra formación integral como profesionales.

A nuestros compañeros, sólo palabras de agradecimiento, especialmente por aquellos momentos en los que una voz de aliento y su apoyo incondicional, fue primordial para seguir adelante.

Agradecemos de manera especial y sincera al M.Sc. Yahir Enrique Gonzalez Doria, por aceptarnos para realizar esta tesis de pregrado bajo su dirección. Su apoyo y confianza en nuestro trabajo y su capacidad para guiar nuestras ideas ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en nuestra formación como investigadores.

Los autores de este trabajo desean agradecer al centro de Investigación para el Desarrollo y la Innovación CIDI, a la facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Montería y al aporte de recursos del Convenio 753 de 2013 “Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe B pin No 2012000100026 (Gobernación de Córdoba – UPB Montería), por el inmenso respaldo que brindaron durante la elaboración de este proyecto. De igual manera, agradecemos al Ph. D Jorge Mario Mendoza Fandiño, por su enseñanza, apoyo y constante disposición durante todo el proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xvii</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos .....	4
<b>1. REVISIÓN DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 ENERGÍA RENOVABLE Y BIOMASA.....</b>	<b>6</b>
1.2 ¿QUÉ ES LA BIOMASA?.....	6
1.3 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS (BSD) .....	6
1.3.1 Ventajas de los biocombustibles sólidos densificados.....	8
1.4 BRIQUETAS .....	8
1.4.1 Briquetado .....	9
1.5 MECANISMOS DE UNIÓN DE PARTÍCULAS.....	10
1.6 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS AGLOMERADOS. ...	11
1.6.1 Composición química .....	11
1.6.2 Poderes caloríficos .....	11
1.6.3 Variables de inflamabilidad y combustibilidad .....	11
1.6.4 Tamaño de las partículas.....	12
1.6.5 Presión de compactación.....	12
1.7 AGLOMERANTE. ....	13
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS BIOMASAS RESIDUALES, EL CARBÓN MINERAL Y LOS TRES AGLOMERANTES. ....	19
2.1.1 Análisis elemental y próximo .....	19
2.1.2 Acondicionamiento previo a la densificación .....	19
2.1.3 Selección del mejor aglomerante. ....	22
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A PARTIR DE PRUEBAS DE DURABILIDAD MECÁNICA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	23
2.2.1 Diseño experimental .....	23
2.2.3 Elaboración de briquetas .....	25
2.2.4 Prueba de durabilidad mecánica.....	26
2.2.5 Prueba de resistencia a la compresión.....	27

2.3	MEZCLAS ÓPTIMAS .....	29
2.3.1	Cálculo del poder calorífico y el porcentaje de azufre.....	29
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>32</b>
3.1	RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICAS .....	33
3.2	SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE. ....	36
3.3	DISEÑO EXPERIMENTAL .....	37
3.4	BRIQUETAS .....	39
3.4.1	Briquetas de tusa de maíz.....	39
3.4.2	Briquetas de residuo de algodón .....	39
3.4.3	Briquetas de cascarilla de arroz.....	39
3.5	RESULTADOS DE PRUEBAS DE DURABILIDAD MECÁNICA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	40
3.5.1	Tusa de maíz .....	40
3.5.2	Algodón.....	41
3.5.3	Cascarilla de arroz.....	42
3.6	MÉZCLAS ÓPTIMAS. ....	44
3.6.1	Poder calorífico y porcentaje de azufre de las mezclas.....	44
3.6.2	Análisis de resultados experimentales .....	44
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>59</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>67</b>	
ANEXO A – SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE.....	67	
ANEXOS B -PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA .....	70	
ANEXOS C-PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	83	
ANEXOS D– RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA .....	99	
ANEXOS E – PRECISIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN EXPERIMENTALES .....	102	
ANEXOS F– NORMA DE CALIDAD DEL CARBÓN Y SUS MEZCLAS.....	104	
ANEXO G –CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN (MÁQUINA DE COMPRESIÓN INCONFINADA).....	106	



## **LISTA DE ANEXOS**

<b>ANEXO A – SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXOS B -PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS C-PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS D– RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA .....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXOS E – PRECISIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN EXPERIMENTALES ...</b>	<b>102</b>
<b>ANEXOS F– NORMA DE CALIDAD DEL CARBÓN Y SUS MEZCLAS .....</b>	<b>104</b>
<b>ANEXO G –CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN (MÁQUINA DE COMPRESIÓN INCONFINADA).....</b>	<b>106</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1:</b> FACTORES Y VARIABLES DE RESPUESTA.....	23
<b>TABLA 2:</b> LÍMITES DE LOS PORCENTAJES DE FACTORES EN LA MEZCLA. ....	24
<b>TABLA 3:</b> REQUISITOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	29
<b>TABLA 4:</b> RESULTADOS DE ANÁLISIS PRÓXIMO Y ELEMENTAL DE MATERIAS PRIMAS. ....	33
<b>TABLA 5:</b> RESULTADOS DE PRUEBAS MECÁNICA (SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE) .....	36
<b>TABLA 6:</b> DISEÑO EXPERIMENTAL DE MEZCLAS (BATERÍA DE ENSAYO). ....	38
<b>TABLA 7:</b> RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA (TUSA DE MAÍZ). .....	44
<b>TABLA 8:</b> (A) PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN (B) MÉZCLAS ÓPTIMAS .....	51
<b>TABLA 9:</b> RESUMEN DE RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA (RESIDUO DE ALGODÓN). ....	52
<b>TABLA 10:</b> (A) PARÁMETROS DE OPTIMIZACIÓN (B) MÉZCLAS ÓPTIMAS .....	57
<b>TABLA 11:</b> RESULTADO DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA (TUSA DE MAÍZ). ....	99
<b>TABLA 12:</b> RESULTADO DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA (ALGODÓN). ....	100
<b>TABLA 13:</b> RESULTADO DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA (CASCARILLA DE ARROZ). ...	101
<b>TABLA 14:</b> NORMA DE CALIDAD DEL CARBÓN Y SUS MEZCLAS. ....	104

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>GRÁFICO 1:</b> GRÁFICAS DE DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA.....	34
<b>GRÁFICO 2:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE). ....	37
<b>GRÁFICO 3:</b> RESULTADOS DE DURABILIDAD (TUSA DE MAÍZ). ....	40
<b>GRÁFICO 4:</b> RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (TUSA DE MAÍZ). ....	41
<b>GRÁFICO 5:</b> RESULTADOS DE DURABILIDAD (ALGODÓN).....	41
<b>GRÁFICO 6:</b> RESULTADOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (ALGODÓN). ....	42
<b>GRÁFICO 7:</b> RESULTADOS DE DURABILIDAD (CASCARILLA DE ARROZ). ....	42
<b>GRÁFICO 8:</b> RESULTADOS DE RESISTENCIA MECÁNICA (CASCARILLA DE ARROZ). ....	43
<b>GRÁFICO 9:</b> SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA DURABILIDAD EN BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ.....	46
<b>GRÁFICO 10:</b> GRÁFICO DE CONTORNO PARA LA DURABILIDAD EN BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ.....	46
<b>GRÁFICO 11:</b> SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ. ....	48
<b>GRÁFICO 12:</b> GRÁFICO DE CONTORNO PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ. ....	49
<b>GRÁFICO 13:</b> DURABILIDAD VS RESISTENCIA EN BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ. ....	50
<b>GRÁFICO 14:</b> SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA DURABILIDAD EN BRIQUETAS DE RESIDUO DE ALGODÓN.....	54
<b>GRÁFICO 15:</b> GRÁFICO DE CONTORNO PARA LA DURABILIDAD EN BRIQUETAS DE RESIDUO DE ALGODÓN .....	54
<b>GRÁFICO 16:</b> SUPERFICIE DE RESPUESTA PARA LA RESISTENCIA EN BRIQUETAS DE RESIDUO DE ALGODÓN .....	55
<b>GRÁFICO 17:</b> GRÁFICO DE CONTORNO PARA LA RESISTENCIA EN BRIQUETAS DE RESIDUO DE ALGODÓN .....	55
<b>GRÁFICO 18:</b> DURABILIDAD VS RESISTENCIA EN BRIQUETAS DE RESIDUO DE ALGODÓN .	56
<b>GRÁFICO 19:</b> PRECISIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN PARA LA DURABILIDAD MECÁNICA DE BRIQUETAS CON TUSA DE MAÍZ. ....	102
<b>GRÁFICO 20:</b> PRECISIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN PARA LA RESISTENCIA MECÁNICA DE BRIQUETAS CON TUSA DE MAÍZ.....	103
<b>GRÁFICO 21:</b> PRECISIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN PARA LA DURABILIDAD MECÁNICA DE BRIQUETAS CON RESIDUO DE ALGODÓN. ....	104

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1:</b> PELLETS Y BRIQUETAS.....	7
<b>FIGURA 2:</b> SECCIONES DE BRIQUETAS.....	9
<b>FIGURA 3:</b> BRIQUETADORA DE TORNILLO.....	10
<b>FIGURA 4:</b> METODOLOGÍA DEL PROYECTO .....	18
<b>FIGURA 5:</b> MATERIA PRIMA EN ESTADO INICIAL: A) CARBÓN MINERAL; B) TUSA DE MAÍZ; C) CASCARILLA DE ARROZ; D) RESIDUO DE ALGODÓN. ....	20
<b>FIGURA 6:</b> MOLINO DE MARTILLOS.....	21
<b>FIGURA 7:</b> MATERIA PRIMA TRITURADA: A) CARBÓN MINERAL; B) TUSA DE MAÍZ; C) CASCARILLA DE ARROZ; D) RESIDUO DE ALGODÓN.....	21
<b>FIGURA 8:</b> JUEGO DE MALLAS .....	22
<b>FIGURA 9:</b> MÁQUINA BRIQUETADORA. ....	24
<b>FIGURA 10:</b> MÁQUINA BRIQUETADORA (ADAPTACIÓN DEL MANÓMETRO). ....	25
<b>FIGURA 11:</b> PROCESO DE ELABORACIÓN DE BRIQUETAS. ....	26
<b>FIGURA 12:</b> MÁQUINA DE DURABILIDAD. ....	27
<b>FIGURA 13:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA.....	27
<b>FIGURA 14:</b> MÁQUINA DE COMPRESIÓN INCONFINADA. ....	28
<b>FIGURA 15:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN. ....	29
<b>FIGURA 16:</b> BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ EN ESTADO NATURAL. ....	35
<b>FIGURA 17:</b> BRIQUETAS PARA SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE: (A) AGLOMERANTE DE YUCA, (B) AGLOMERANTE DE MAÍZ, (C) AGLOMERANTE DE PLÁTANO .....	36
<b>FIGURA 18:</b> BRIQUETAS DE TUSA DE MAÍZ.....	39
<b>FIGURA 19:</b> BRIQUETAS DE RESIDUO DE ALGODÓN.....	39
<b>FIGURA 20:</b> BRIQUETAS DE CASCARILLA DE ARROZ.....	39
<b>FIGURA 21:</b> BRIQUETAS DE ALGODÓN: (A) AGLOMERANTE DE YUCA, (B) AGLOMERANTE DE MAÍZ, (C) AGLOMERANTE DE PLÁTANO .....	67
<b>FIGURA 22:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA PARA AGLOMERANTE DE YUCA. ....	67
<b>FIGURA 26:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA PARA AGLOMERANTE DE MAÍZ. ....	68
<b>FIGURA 27:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA PARA AGLOMERANTE DE PLATANO. ...	68
<b>FIGURA 28:</b> BRIQUETAS PARA PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	68
<b>FIGURA 29:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA AGLOMERANTE DE MAÍZ. .	69
<b>FIGURA 30:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA AGLOMERANTE DE PLÁTANO. ....	69
<b>FIGURA 31:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PARA AGLOMERANTE DE YUCA. .	69
<b>FIGURA 32:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T1. ....	70
<b>FIGURA 33:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T2. ....	70
<b>FIGURA 34:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T3. ....	70
<b>FIGURA 35:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T4. ....	71
<b>FIGURA 36:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T5. ....	71
<b>FIGURA 37:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T6. ....	71
<b>FIGURA 38:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T7. ....	71
<b>FIGURA 39:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T8. ....	72
<b>FIGURA 40:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T9. ....	72
<b>FIGURA 41:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T10. ....	72
<b>FIGURA 42:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T11. ....	72
<b>FIGURA 43:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T12. ....	73

<b>FIGURA 44:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T13. ....	73
<b>FIGURA 45:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T14 .....	73
<b>FIGURA 46:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T15 .....	73
<b>FIGURA 47:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T16. ....	74
<b>FIGURA 48:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A1. ....	74
<b>FIGURA 49:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A2. ....	74
<b>FIGURA 50:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA T3. ....	75
<b>FIGURA 51:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A4. ....	75
<b>FIGURA 52:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A5 .....	75
<b>FIGURA 53:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A6. ....	75
<b>FIGURA 54:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A7. ....	76
<b>FIGURA 55:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A8. ....	76
<b>FIGURA 56:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A9. ....	76
<b>FIGURA 57:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A10. ....	76
<b>FIGURA 58:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A11. ....	77
<b>FIGURA 59:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A12. ....	77
<b>FIGURA 60:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A13. ....	77
<b>FIGURA 61:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A14. ....	77
<b>FIGURA 62:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A15. ....	78
<b>FIGURA 63:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA A16. ....	78
<b>FIGURA 64:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C1. ....	78
<b>FIGURA 65:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C2. ....	79
<b>FIGURA 66:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C3. ....	79
<b>FIGURA 67:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C4. ....	79
<b>FIGURA 68:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C5. ....	79
<b>FIGURA 69:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C6. ....	80
<b>FIGURA 70:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C7. ....	80
<b>FIGURA 71:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C8. ....	80
<b>FIGURA 72:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C9 .....	81
<b>FIGURA 73:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C10. ....	81
<b>FIGURA 74:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C11. ....	81
<b>FIGURA 75:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C12. ....	82
<b>FIGURA 76:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C13. ....	82
<b>FIGURA 77:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C14. ....	82
<b>FIGURA 78:</b> PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA DE LA MEZCLA C16. ....	83
<b>FIGURA 79:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T1.....	83
<b>FIGURA 80:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T2.....	83
<b>FIGURA 81:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T4.....	84
<b>FIGURA 82:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T5.....	84
<b>FIGURA 83:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T6.....	84
<b>FIGURA 84:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T7.....	85
<b>FIGURA 85:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T8.....	85
<b>FIGURA 86:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T9.....	85
<b>FIGURA 87:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T10.....	86
<b>FIGURA 88:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T11.....	86
<b>FIGURA 89:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T12.....	86
<b>FIGURA 90:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T13.....	87

<b>FIGURA 91:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T14.....	87
<b>FIGURA 92:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T15.....	87
<b>FIGURA 93:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA T16.....	88
<b>FIGURA 94:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A1. ....	88
<b>FIGURA 95:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A2. ....	88
<b>FIGURA 96:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A3. ....	89
<b>FIGURA 97:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A4. ....	89
<b>FIGURA 98:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A5. ....	89
<b>FIGURA 99:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A6. ....	90
<b>FIGURA 100:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A7. ....	90
<b>FIGURA 101:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A8. ....	90
<b>FIGURA 102:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A9. ....	91
<b>FIGURA 103:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A10. ....	91
<b>FIGURA 104:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A11. ....	91
<b>FIGURA 105:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A12. ....	92
<b>FIGURA 106:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A13. ....	92
<b>FIGURA 107:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A14. ....	92
<b>FIGURA 108:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A15. ....	93
<b>FIGURA 109:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA A16. ....	93
<b>FIGURA 110:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C1. ....	93
<b>FIGURA 111:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C2. ....	94
<b>FIGURA 112:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C3. ....	94
<b>FIGURA 113:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C4. ....	94
<b>FIGURA 114:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C5. ....	95
<b>FIGURA 115:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C6. ....	95
<b>FIGURA 116:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C7. ....	95
<b>FIGURA 117:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C8. ....	96
<b>FIGURA 118:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C9. ....	96
<b>FIGURA 119:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C10. ....	96
<b>FIGURA 120:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C11. ....	97
<b>FIGURA 121:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C12. ....	97
<b>FIGURA 122:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C13. ....	97
<b>FIGURA 123:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C14. ....	98
<b>FIGURA 124:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C15. ....	98
<b>FIGURA 125:</b> PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE LA MEZCLA C16. ....	98

## RESUMEN

La realidad actual de nuestro contexto exige crecientemente el uso de fuentes de energía renovables, que impulsen el desarrollo de nuestra sociedad, de una manera limpia, eficiente y sostenible; La biomasa es sin duda, una de las fuentes de energía renovables de mayor relevancia en la actualidad, debido a sus importantes propiedades energéticas y medioambientalmente amigables, sin embargo la baja densidad que esta posee, representa el principal inconveniente para un aprovechamiento energético en estado sólido.

Esta investigación tuvo como objetivo, establecer las mezclas óptimas en la elaboración de biocombustibles sólidos densificados (briquetas), a partir de tres biomásas residuales agroindustriales, como son, la tusa de maíz, cascarilla de arroz y residuos de algodón, adicionando carbón mineral y tres bioaglomerantes, con el fin de lograr un mejoramiento de las condiciones de transporte y almacenamiento de la biomasa, evaluando propiedades como la resistencia a la compresión y durabilidad en las briquetas. Además, mejorar el potencial energético de la biomasa en estado natural, conservando un bajo porcentaje de azufre.

Con base en esto, la primera fase del proyecto la conforma el estudio preliminar y la adquisición de los tres tipos de biomasa, los tres bioaglomerantes y el Carbón mineral, seguido del acondicionamiento previo a la densificación, fase en la que se realiza la reducción granulométrica, análisis granulométrico, análisis elemental y próximo, lo que permite establecer las características fisicoquímicas de la biomasa y el carbón mineral. Luego, se definen los rangos de concentración en masa de cada uno de los factores en la mezcla biomasa-carbón-aglomerante, para así desarrollar un diseño experimental, que permita obtener una batería de ensayos, mediante la cual se estudió la interacción de los

tres factores antes mencionados. También, se definen las dimensiones y forma de las briquetas, para iniciar la densificación de las mezclas utilizando un equipo de compactación (briquetadora). En última instancia, se realizó las pruebas de durabilidad y resistencia a la compresión en las briquetas, seguido del análisis de resultados.

Los resultados obtenidos en el estudio, muestran que se encontraron las mezclas óptimas, para briquetas a base de tusa de maíz, con porcentaje de aglomerante de 5%, biomasa de 68 a 71% y carbón mineral de 24 a 27%, así mismo, se logró aumentar el poder calorífico de la briqueta hasta en un 11,85% respecto al de la biomasa pura, conservando buenas propiedades de durabilidad y resistencia a la compresión, además de un porcentaje de azufre de 0,3%. Por otra parte, para las briquetas hechas a base de residuos de algodón, se definió como mezcla óptima aquella con porcentaje de aglomerante de 9% y biomasa de 91%, obteniendo una resistencia a la compresión de 221 Kgf, una durabilidad de 93,3% y el porcentaje de azufre más bajo de las posibles soluciones con un valor de 0,18%, debido a la ausencia de carbón mineral en la composición, ya que con la inclusión de este no se logró una mejora en el potencial energético de la briqueta respecto a la biomasa pura, además de ser el factor que disminuye las propiedades mecánicas del densificado. Respecto a la cascarilla de arroz, no se lograron desarrollar briquetas con buenas propiedades mecánicas según las normativas.

**Palabras Clave:** Biocombustibles, durabilidad, resistencia a la compresión, poder calorífico, briquetas, bio-aglomerante.



## **ABSTRACT**

In order to promote a clean, efficient and sustainable development for our society; the use of renewable energy is mandatory. Currently, biomass is one of the major renewable energy due to its properties; however, its low density may be an obstacle for using it in solid state.

In this work, densified solid biofuels known as briquettes were manufactured employing different ratios of maize cobs, rice husks and cotton waste agro-industrial residual biomasses, coal and three biobinder. Elemental and proximal analyses were carried out in order to determine chemical composition and calorific value respectively.

A three factor simplex lattice experiment design was conducted in order to find out the biomasses-coal-biobinder ratio that produced the higher durability, compressive strength and specific heat as well as the lower sulfur percentage. The mass percentage of biomasses, coal and biobinder were between 40-95, 0-40 and 5-20 respectively. Briquettes of 50 g, 52 mm of diameter and 80 mm of length were fabricated in a manual briquette machine at 7 MPa of pressure. The briquettes were submitted to compressive and mechanical durability tests according to NTC-2060 y CEN/TS 15210 standards in order to evaluate the transportation and storage biomasses characteristics. The three biomasses are mainly composed of Carbon, Nitrogen, Hydrogen and sulfur. The cotton waste biomass exhibited the greater calorific value of 4276 Cal/g followed by maize cobs and rice husks, with 3792 and 3777 Cal/g respectively. The results showed that 31 % of the overall maize cobs and cotton waste brickettes crossed the threshold of 90% of durability established at the standards. In contrast, rice husks briquets only showed 3,32% of durability. The design of experiment showed that the biomasses-coal-biobinder

ratio of 68-71%, 24-27% and 5% for maize cobs exhibited the higher durability, compressive strength and specific heat as well as the lower sulfur percentage, however,

**Key words:** Biofuels, Durability, compressive strength, calorific power, briquettes, bio-binders.

.

## INTRODUCCIÓN

En el departamento de Córdoba la agricultura es una de las principales actividades económicas, contando con un total de 103.007 hectáreas de tierra dedicadas a esta actividad, de las cuales 43.979 son utilizadas para la siembra de Maíz con una producción anual aproximada de 154.273 toneladas, 8.158 hectáreas son utilizadas en la siembra de Arroz con una producción anual aproximada de 17.751 toneladas y 26.111 hectáreas en la siembra de Algodón con una producción anual aproximada de 46.891 toneladas(DANE,2011), es importante destacar el papel del departamento de Córdoba en cultivos como el Maíz, Arroz y Algodón, debido a que cubre un alto porcentaje del total de la producción nacional, 14, 18 y 53 % respectivamente (DANE, 2011).

Estos cultivos generan residuos que se han convertido en una fuente de contaminación, considerando que usualmente son quemados a cielo abierto, sumado al hecho de que no generan ningún tipo de valor agregado para el productor y presentan sobrecostos de manejo. Además, si se piensa en la utilización de estos residuos agrícolas en estado natural con fines energéticos, debido a su baja densidad se hace necesario grandes volúmenes de almacén y sus desiguales características morfológicas encarecen notablemente su utilización (Torres, 2008). Por lo tanto, es de suma importancia que estos residuos tengan un proceso que mejore sus características energéticas, manipulación, transporte y almacenamiento.

De esta manera, merece especial atención el uso de las biomásas residuales como biocombustibles sólidos, mediante la aplicación de procesos de densificación tales como empaquetado, cubicación, granulación o la fabricación de briquetas, los cuales mejoran de forma sustancial la densidad energética de la biomasa (Sánchez, 2012).

Los biocombustibles sólidos obtenidos a través de estos procesos de densificación, en específico las llamadas “briquetas”, simplifican la logística de manejo y almacenamiento, puesto que tienen forma y tamaño definido, tienen bajo contenido de polvo (seguridad durante la manipulación), son secas y pueden ser almacenadas sin degradar (Kaliyan, Marzo, 2008), sumado al hecho de que las propiedades energéticas de la biomasa en cuanto a combustible sólido, son algo similares a las del carbón sub-bituminoso, ya que este tiene un poder calorífico promedio de aproximadamente 21 350 kJ/kg (Energía & (UPME), 2006), mientras que los residuos agrícolas (biomasa) tienen un poder calorífico promedio de 18 600 kJ/kg en base seca, lo que convierte a las “briquetas” en una atractiva alternativa para el uso de la biomasa residual con fines energéticos, tales como, la combustión de pequeñas estufas e instalaciones de calefacción, y la generación de electricidad basada en el ciclo de vapor convencional (Augusto Estrada, Meneses, & Alberto, 2004).

Investigaciones realizadas por (Stolarski et al., 2013) concluyen que recientemente en Polonia, así como en el resto de la Unión Europea (UE), se han utilizado cada vez más a menudo fuentes renovables en la generación de energía. En 2009, la energía procedente de fuentes renovables en la UE representó el 18,3% del total de energía primaria, de la cual la mayoría se obtiene a partir de biomasa sólida.

Para (Temmerman, Rabier, Jensen, Hartmann, & Böhm, 2006), la durabilidad y la densidad de las partículas son los principales parámetros que describen la calidad física de los biocombustibles sólidos densificados como pellets y briquetas.

Según (Soto & Núñez, 2008), Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente.

En este orden de ideas, con este proyecto se pretendió aprovechar la biomasa residual de los cultivos más comunes del departamento de Córdoba, mediante la elaboración de briquetas con carbón mineral de la mina la Guacamaya de Puerto Libertador (Córdoba), caracterizado por tener un porcentaje de Azufre muy elevado y no ser muy comercial, por ende, al mezclarlo con la biomasa residual, se buscó que el Carbón disminuyera su porcentaje de Azufre y aumentara el poder calorífico de la briqueta, proporcionando una alternativa para el uso de este carbón y una mejora en las características energéticas de la briqueta, que junto a la evaluación de las propiedades como la durabilidad y resistencia a la compresión, fueron los criterios para definir las mezclas más favorables, que presentan el mejor comportamiento frente a procesos de manipulación y de transporte.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Elaborar biocombustibles sólidos densificados a partir de tres biomasas residuales, tres tipos de aglomerante y carbón mineral del departamento de córdoba, para un aprovechamiento energético, y mejoramiento de las condiciones de transporte y almacenamiento de la biomasa.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de las biomasas residuales, el carbón mineral y los tres aglomerantes.
- Caracterizar los biocombustibles sólidos densificados a partir de pruebas de durabilidad mecánica y resistencia a la compresión.
- Establecer las mezclas óptimas de aglomerante, carbón y biomasa, con el fin de obtener briquetas con buenas propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad, así como mejorar el potencial energético de la biomasa en estado puro, conservando un bajo porcentaje de azufre.

## **1. REVISIÓN DE LITERATURA**

## **1.1 ENERGÍA RENOVABLE Y BIOMASA**

Las “Energías Renovables” fueron denominadas inicialmente con adjetivos tales como: Complementarias, limpias, alternativas o nuevas. Cada uno de estos le aporta un significado particular, por ejemplo cuando se habla de “complementarias” se indica que ayudan a suplir las necesidades energéticas suministradas por las energías clásicas (Carbón, Petróleo, Gas Natural, Nuclear e Hidroeléctricas), al hablar de “limpias”, se quiere reseñar que no son o que son menos contaminantes que las energías convencionales y se les denomina “alternativas” ante una posible crisis del petróleo; aunque esta alternativa hoy por hoy no supliría en su totalidad las energías clásicas. (Martín,2005).

## **1.2 ¿QUÉ ES LA BIOMASA?**

Para autores como Trueba, doctor Ingeniero Agrónomo, la biomasa es cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen como consecuencia de un proceso biológico. Tal vez una definición de biomasa actual nos diga que ésta es el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal o animal obtenida naturalmente o por alteración artificial de la anterior. (Martín, 2005)

## **1.3 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS (BSD)**

La densificación de residuos agrícolas se puede lograr mediante el empaquetado, cubicación, granulación, o la fabricación de briquetas. La densidad aparente de las biomasa de origen vegetal está en rangos de 50 a 130 kg/m<sup>3</sup> dependiendo de las especies de plantas, tamaño de partícula y su distribución. Como un combustible sólido, la biomasa es algo similar al carbón. Por ejemplo, el carbón bituminoso tiene



aproximadamente 30 200 kJ/kg, mientras que los residuos agrícolas tienen un promedio de 18 600 kJ/kg en base seca (Kaliyan, Marzo,2008).

Los procesos de densificación simplifican la logística de manejo y almacenamiento, mejoran la estabilidad de la biomasa y facilitan la alimentación de combustibles sólidos a partir de esta, que en algunos casos pueden acercarse el poder calorífico del carbón.

Los biocombustibles sólidos como pellets y briquetas (ver figura 1) se utilizan más ampliamente en combustión de pequeñas estufas a instalaciones de calefacción, y se utilizan con facilidad para la generación de electricidad basada en el ciclo de vapor convencional. En el futuro, estos pueden ser utilizados para el suministro de combustibles líquidos basados en un proceso de gasificación para el suministro de un gas utilizado para la síntesis de combustibles líquidos. (Kaliyan, Marzo,2008.)

Al estudiar los usos de la biomasa con fines energéticos merecen especial interés los biocombustibles o “combustibles no fósiles”, entre ellos se incluyen los pellets y las briquetas (Sánchez, 2012).



**Figura 1:** Pellets y briquetas.

*Fuente: (Torres, 2008)*

Para la utilización de este tipo de materiales es necesario que tengan ciertas características, producto del acondicionamiento parcial o total previo a la densificación. Para obtener productos compactados de calidad es preciso que el contenido en humedad no supere valores del orden del 15% B.h (base húmeda) y que esté por encima de valores

del 8% puesto que por debajo de este nivel no se obtiene una adecuada aglomeración, ya que el agua en determinadas proporciones actúa como sustancia termoplástica favoreciendo la autoaglomeración, por tanto, si no alcanza esos porcentajes mínimos la compactación es defectuosa. En cuanto al factor de granulometría, es evidente que una cierta uniformidad estructural es importante para obtener densificados de elevada calidad, empleandose materiales finos con granulometrias inferiores a 3 mm (Torres,2008).

### **1.3.1 Ventajas de los biocombustibles sólidos densificados**

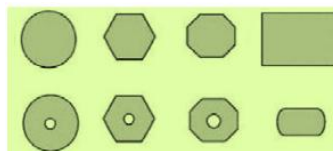
Algunas de las ventajas añadidas de los productos densificados se enumeran a continuación: (Kaliyan, Marzo,2008)

1. Bajo contenido de polvo, por lo tanto, aumenta la seguridad durante la manipulación.
2. Características mejoradas en cuanto a manejo y almacenamiento.
3. Capacidades de medición / dosificación mejorada.
4. Forma y tamaño definido.
5. Mayor densidad de energía.
6. Mejora el atractivo del producto (valor añadido).
7. Valor de las ventas aumenta (comercialización).
8. Es seco y puede ser almacenado sin degradar.

## **1.4 BRIQUETAS**

El término "briqueta" es confuso porque puede estar fabricada con diversos materiales compactados, entre los cuales se destacan: La biomasa forestal (procedente de aserraderos, fábricas de puertas, muebles, etc.), biomasa residual industrial y urbana, carbón vegetal o simplemente una mezcla de todas ellas.

La forma de las briquetas puede ser variable y depende de la maquinaria utilizada en su fabricación. Sin embargo, las producidas en la actualidad suelen presentar una sección cilíndrica; aunque también existen de tipo octogonal, con un hueco circular en el centro, o la sección rectangular, ligeramente redondeada en las cuatro esquinas, lo que le confiere una mayor resistencia en el manejo a los golpes (ver figura 2) . Este tipo de briquetas se almacenan mucho mejor, pues ocupan menos volumen a igualdad de peso que el tipo cilíndrico o el de prisma octogonal hueco, además de arder más despacio (Sánchez, 2012).



**Figura 2:** Secciones de briquetas

*Fuente:* (Sánchez, 2012) Pag.5

#### **1.4.1 Briquetado**

Durante el proceso de briquetado se generan mecánicamente elevadas presiones (200 MPa/cm<sup>2</sup>), que provocan un incremento térmico del orden de 100 a 150° C; esta temperatura origina la plastificación de la lignina que actúa como elemento aglomerante de las partículas de madera, por lo que no es necesaria la adición de productos aglomerantes. Cuando se dispone de materiales con tamaño máximo de 0,5 a 1 cm y humedad entre 8 y 15 % C, la fabricación de briquetas es muy económica (40 – 60 kWh/Ton). Sin embargo, si es necesario secar o moler los residuos previamente, los costos se incrementan. (Torres, 2008)

Los principales tipos de briquetadoras utilizadas son: De pistón (densificación por impacto), de tornillo (densificación por extrusión) (ver figura 3), hidráulica y neumática.



**Figura 3:** Briquetadora de tornillo

*Fuente:* (Martín, 2005) *Pag.56*

### **1.5 MECANISMOS DE UNIÓN DE PARTÍCULAS.**

La calidad de la biomasa densificada depende de un número de variables de proceso, como diámetro de la matriz, temperatura de la boquilla, la presión, el uso de los aglutinantes, y el precalentamiento de la mezcla de la biomasa. De acuerdo a estudios de Tabil y Sokhansanj (1996), los dos aspectos importantes a tener en cuenta durante la densificación son (1) la capacidad de las partículas para formar gránulos con una considerable resistencia mecánica; y (2) la capacidad del proceso para aumentar la densidad. La primera es una cuestión de comportamiento fundamental que detalla qué tipo de unión o de enclavamiento del mecanismo resultaba en la biomasa un mejor densificado. El posible mecanismo de unión durante la compactación podría ser debido a la formación de puentes sólidos. Durante este procedimiento, los puentes sólidos son desarrollados por las reacciones químicas y la sinterización, el endurecimiento del aglutinante, la solidificación de las sustancias fundidas, o cristalización de los materiales disueltos. La presión aplicada durante la densificación también reduce el punto de fusión de las partículas y hace que se muevan uno hacia el otro, lo que aumenta el área de contacto y cambia el punto de fusión a un nuevo nivel de equilibrio (Tumuluru, Wright, Kenny, & Hess, 2010).

La atracción entre las partículas es debido a las fuerzas electrostáticas o magnéticas van der Waals (Schineberger, 1971), que son inversamente proporcional a la distancia entre las partículas. La Influencia de fuerzas electrostáticas en la unión de las partículas es despreciable, y estos se encuentran comúnmente en los polvos finos secos donde la fricción entre las partículas también puede contribuir a la unión de éstas cuando existen fuerzas magnéticas (Sherrington y Oliver 1981).

## **1.6 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS DE LOS AGLOMERADOS.**

### **1.6.1 Composición química**

Es de gran interés estudiar la composición química elemental de las briquetas porque ésta condiciona su poder calorífico. Además, dependerá del material utilizado en su constitución (si se emplean aditivos habrá de tenerse en cuenta la composición química de los mismos).

Lo ideal es conocer los porcentajes (en peso) de biomasa y aditivos empleados; así como la humedad a la que se manipulan estos productos. Conocidos estos porcentajes puede evaluarse de forma aproximada la composición química de briquetas (Martín, 2005).

### **1.6.2 Poderes caloríficos**

El poder calorífico de las briquetas será función del material de procedencia. Suponiendo que es madera sin aditivos su poder calorífico será el de la madera que proviene (Martín, 2005).

### **1.6.3 Variables de inflamabilidad y combustibilidad**

El tiempo de inflamabilidad de las briquetas es similar o ligeramente superior al de las leñas. Estas últimas presentan temperaturas y tiempos de inflamabilidad muy variables,

pues depende de la existencia o no de corteza. Los biocombustibles que más pronto se queman suelen ser las astillas y el carbón vegetal (a igualdad de parámetros).

La temperatura de inflamabilidad es ligeramente superior en los densificados de biomasa que en las astillas. Al ser la briqueta un material más denso que la madera, y por tener menos contenido de aire en su interior, el coeficiente de transmisión térmica de ésta es mayor que el de aquella. La alta densidad y el bajo valor de este coeficiente provocan que las briquetas ardan más despacio a diferencias de los pellets que arden mucho más deprisa (Martín, 2005).

#### **1.6.4 Tamaño de las partículas**

En la mayor parte de la materia orgánica, es difícil lograr una compactación de forma directa, debido a que es necesario que las partículas del material orgánico tengan un tamaño apropiado, que permita una adecuada ubicación de éstas entre los intersticios de la estructura, obteniéndose una mejor densificación y acabado de la briqueta.

El mejor aspecto exterior de las briquetas se obtiene cuando las fracciones de las partículas de aserrín y otros productos agrícolas, son inferiores a 3 mm. (Edison & Fernando, 2011)

#### **1.6.5 Presión de compactación**

La compactación de la materia prima mejora sus características como combustible, por ejemplo aumenta su poder calorífico, reduce el costo de transporte y puede ser fuente fundamental de uso en las zonas rurales en donde no se tiene acceso a otros tipos de combustibles. (Edison & Fernando, 2011).

- Altas presiones de compactación ( $>100$  MPa).

- Medianas presiones de compactación con dispositivos de calentamiento (5– 100 MPa).
- Bajas presiones de compactación con el uso de aglutinantes (<5 MPa).

### **1.7AGLOMERANTE.**

Los aglutinantes (ligantes, aglomerantes) son sustancias que son capaces de generar fuerzas para unir fragmentos, partículas de una o varias sustancias o materiales y dar cohesión al conjunto por métodos físicos, químicos o térmicos (Edison & Fernando, 2011). El aglomerante para la elaboración de briquetas orgánicas debe ser de fácil preparación, aplicación, obtención y tener un costo relativamente bajo, así como también es fundamental que este no sea nocivo, ni contaminante durante su combustión, además debe contar con un fácil mezclado con la materia prima, poseer buenas propiedades de adhesión y presentar resistencia mecánica considerable.

La biomasa tiene carácter de energía renovable, debido a que el contenido energético que posee, es procedente en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético. Esta energía se libera al romper los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión, dando como productos finales dióxido de carbono y agua. A partir de esto, se denominan como biocombustibles a los productos procedentes de la biomasa que se utilizan para fines energéticos, los cuales pueden ser de tipo sólido, líquido o gaseoso según su estado físico (Fernández, 2004).

Investigaciones realizadas por (Stolarski et al., 2013) concluyen que recientemente en Polonia, así como en el resto de la Unión Europea (UE), se han utilizado cada vez más a menudo recursos alternativos en la generación de energía. En 2009, la porción de esta última procedente de fuentes renovables en la UE representó el 18,3% del total de

energía primaria, de la cual la mayoría se obtiene a partir de biomasa sólida. La utilización de los residuos agrícolas y forestales es a menudo difícil debido a sus desiguales y problemáticas características. Este inconveniente puede ser superado por medio de densificación, es decir, la compactación de los residuos en productos de alta densidad y forma regular. La densificación ha despertado un gran interés en todo el mundo en los últimos años como una técnica de beneficio para la utilización de los residuos sólidos como fuente de energía (Bhattacharya, 2002). De manera similar, (Torres, 2008) afirma que para el caso del aprovechamiento energético de biomasa residual, su baja densidad hace necesarios grandes volúmenes de almacén y encarece notablemente el transporte y el manejo por lo que, para evitar estos inconvenientes, se procede a compactarlos (densificarlos), obteniéndose productos elaborados como briquetas y pellets, que presentan ventajas adicionales como la limpieza, homogeneidad y facilidad de manejo, a la vez que se reducen considerablemente las pérdidas por degradación durante periodos de almacenamiento largos.

Para (Temmerman, Rabier, Jensen, Hartmann, & Böhm, 2006), la durabilidad y la densidad de las partículas son los principales parámetros que describen la calidad física de los biocombustibles sólidos densificados como pellets y briquetas. Ambos tipos de combustibles son susceptibles a desgaste mecánico, lo que conduce a la producción de partículas finas o polvo durante el transporte, manipulación y almacenamiento.

Se llevó a cabo un importante estudio por parte de (Wamukonya & Jenkins, 1995) con el fin de determinar la posibilidad de producir briquetas duraderas con paja de trigo y aserrín, como combustible para los hogares y pequeñas industrias de Kenia. Se determinó la expansión longitudinal de las briquetas en intervalos de tiempo específicos durante un periodo total de una semana, además el contenido de humedad y la durabilidad de estas



briquetas se midieron después de un período de almacenamiento de dos semanas a aproximadamente 20° C y humedad relativa del 50%. Se obtuvo que las briquetas de aserrín fueron mas duraderas con un valor promedio de 88,4 % y exhibieron un menor grado de expansión longitudinal de 70 %, mientras que aquellas hechas con paja de trigo mostraron una menor durabilidad con un promedio de 46,5 %, y un mayor grado de expansión de 150% en aumento, sin embargo se encontró también que la mezcla de aserrín y paja de trigo con igualdad de fracciones en la mezcla mejoran considerablemente la durabilidad, respecto a los resultados con paja de trigo, presentando un aumento de 10 % . Parece entonces, que hay una relación directa entre la expansión de longitud y la durabilidad de las briquetas.

(Ivanova, Kolarikova, Havrland, & Passian, 2014) Realizaron un trabajo de investigación centrado en la determinación y comparación de durabilidad mecánica de briquetas producidas a partir de cultivos energéticos seleccionados, como son la biomasa de alto rendimiento anual y cultivos de plantas perennes, tales como el miscanthus, carrizo, knotweed gigante, el sorgo dulce y el cáñamo industrial, que pueden ser una fuente de energía renovable en los ámbitos adecuados. Se hicieron briquetas en estados puros y mezclados con biomasa de madera, para un total de veinte tipos de briquetas producidas por prensa hidráulica de pistón y su durabilidad mecánica se determinó de acuerdo con las normas europeas de biocombustibles sólidos. La investigación dio como resultado que la durabilidad de este tipo de briquetas se puede aumentar con la adición de residuos de madera y que el contenido de humedad del material debe ser tenido en cuenta en el proceso de fabricación, ya que tiene un gran impacto en la calidad final de las briquetas producidas.

Con el fin de estudiar la influencia de la presión, la temperatura, la humedad y el tamaño de partícula sobre las propiedades físicas (densidad, durabilidad, resistencia a la compresión y resistencia al impacto) de briquetas hechas a partir de *Caragana korshinskii* Kom, (Zhang & Guo, 2014) realizaron una investigación en la cual fue examinada la relación entre estos factores y las respuestas (propiedades físicas), mediante un análisis estadístico multivariable. Se obtuvo entonces que el factor más influyente en las propiedades físicas de las briquetas es el tamaño de partícula, seguido por el contenido de humedad y la temperatura. Así, se pueden producir briquetas de buena calidad usando un tamaño de partícula reducido entre 0,16 y 0,63 mm, un bajo contenido de humedad (8-14%) y condiciones de alta temperatura (90-150°). La presión no fue un factor relevante en el experimento.

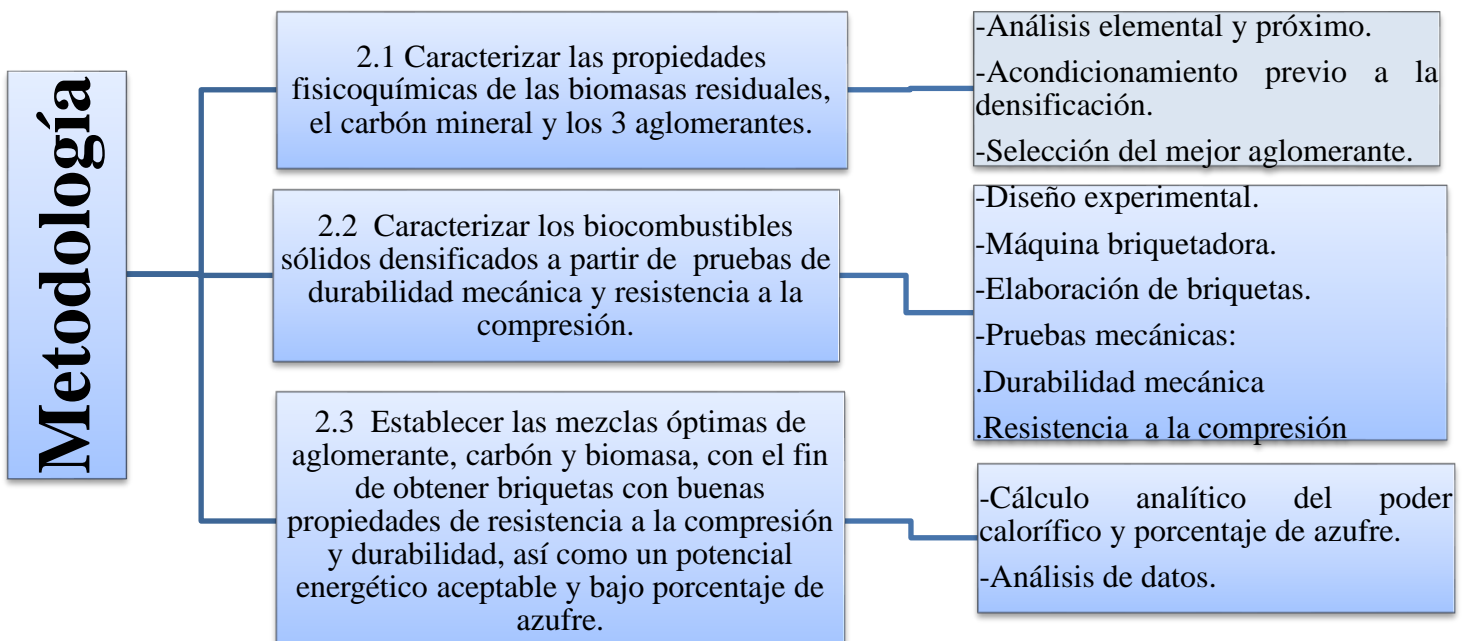
Según (Soto & Núñez, 2008), Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente.

Se han desarrollado varias investigaciones que sugieren que la combustión de los pellets y briquetas es más atractiva ambientalmente, debido a que reduce las emanaciones de CO<sub>2</sub> en un 50% comparado con la combustión de leña o astillas, posee bajas concentraciones de azufre y nitrógeno entre 0.004 - 0.007 % y 0.05 - 0.16 % del peso seco final de cada pellet respectivamente . En consecuencia la combustión de pellets contribuye a disminuir las concentraciones de CO<sub>2</sub>, óxidos de azufre y nitrógeno causantes del “efecto invernadero” y el cambio climático (Soto & Núñez, 2008).

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

Se elaboraron briquetas a partir de biomasa residual, carbón mineral y un aglomerante natural. Partiendo de un diseño experimental, que además permitió determinar de qué manera las variables de respuesta son influenciadas por la interacción entre los factores. Las briquetas fueron sometidas a ensayos mecánicos, los cuales miden la capacidad de los biocombustibles sólidos densificados a permanecer intactos frente a procesos de manipulación y transporte. Estos resultados obtenidos, junto al porcentaje de azufre y el poder calorífico calculado para cada briqueta utilizando un método determinístico, fueron el punto de partida para encontrar las mezclas óptimas, en cuanto a la calidad de la briqueta frente a procesos de manipulación y transporte, mejorando el potencial energético de la biomasa pura y conservando un bajo porcentaje de azufre según las normativas ambientales.

En este orden de ideas, a continuación se describe la metodología que se utilizó para el desarrollo del proyecto (Ver figura 4).



**Figura 4:** Metodología del proyecto

*Fuente: Autores,(2015).*

## **2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS BIOMASAS RESIDUALES, EL CARBÓN MINERAL Y LOS TRES AGLOMERANTES.**

Una vez adquirida la materia prima con la cual se realizaron las briquetas, se hizo necesario caracterizar sus propiedades fisicoquímicas, a fin de direccionar correctamente la investigación en cuanto a las propiedades finales de las briquetas.

### **2.1.1 Análisis elemental y próximo**

A partir del análisis elemental se determinó el contenido de Carbono, Hidrogeno, Nitrógeno, Oxígeno y Azufre presente en cada una de las materias primas, y se evaluaron por medio del análisis próximo la humedad residual, porcentaje de cenizas, material volátil, y carbono fijo. Además, se estimó el poder calorífico de cada material de acuerdo a su composición.

Estos análisis se realizaron en la Universidad Nacional de Colombia y se hacen con el fin de conocer la composición química de todo el material de trabajo, además de proporcionar información necesaria para establecer las mezclas óptimas, como lo son el porcentaje de azufre y el poder calorífico.

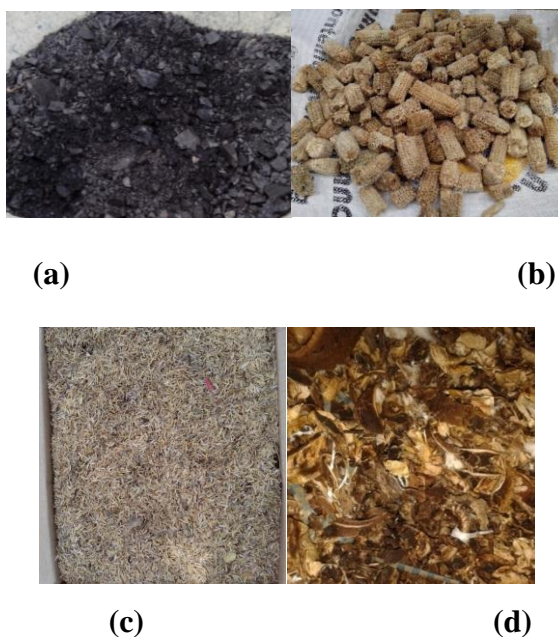
### **2.1.2 Acondicionamiento previo a la densificación**

Para la obtención de briquetas de calidad y un buen acabado, se requiere de una preparación especial de la materia prima a utilizar, la cual atiende en mayor medida al tamaño de partícula de las mezclas para la fabricación de las briquetas, ya que este determina la densidad, resistencia, durabilidad mecánica y acabado de las mismas

(Edison & Fernando, 2014). Siendo así, uno de los factores más importantes en este proceso.

#### 2.1.2.1 Reducción granulométrica

Haciendo referencia a lo dicho anteriormente, el proceso para la fabricación de las briquetas inicia con la molienda o trituración de la materia prima, es decir, las biomásas y el carbón mineral. En la figura 5, se observan las tres biomásas y el carbón mineral en su estado inicial.



**Figura 5:** Materia prima en estado inicial: a) Carbón mineral; b) Tusa de maíz; c) Cascarilla de arroz; d) Residuo de algodón.

*Fuente: Autores,(2015). Registro fotográfico*

Para el proceso de molienda se trabajó con un molino de martillos (ver figura 6), el cual cuenta con una potencia nominal de 10 HP, capaz de triturar tanto biomasa, como carbón mineral. Éste, entregó además una capacidad aproximada de 15 Kg/h para la tusa de maíz, 40 Kg/h para cascarilla de arroz, 30 Kg/h para residuos de algodón y para carbón mineral presenta una capacidad de hasta 20 kg/h.



**Figura 6:** Molino de martillos

*Fuente: Autores,(2015). Registro fotográfico*

En el molino de martillos se usó un tamiz de 2 mm, asegurando así un tamaño de partícula recomendado por la bibliografía en la materia prima inferior a 3 mm, recomendado por la bibliografía, excepto con la cascarilla de arroz, la cual se trituró usando un tamiz de 1 mm, debido a su reducido tamaño de partícula inicial. Es importante destacar que las pérdidas de material en la molienda de las biomásas fueron hasta de un 30%, lo que limita el proceso a un solo paso por el molino (Ver figura 7).



**(a)**

**(b)**



**(c)**

**(d)**

**Figura 7:** Materia prima triturada: a) Carbón mineral; b) Tusa de maíz; c) Cascarilla de arroz; d) Residuo de algodón

*Fuente: Autores,(2015). Registro fotográfico*

### 2.1.2.2 Tamizado

Se caracterizó la granulometría de las biomásas y el carbón por medio de un proceso de tamizado, utilizando el ensayo U.S.A standard testing siere, regido por la norma ASME E-11/2004 en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana (Ver figura 8). Con este ensayo se buscó determinar rangos en el tamaño de partícula del material ya triturado (distribución granulométrica), teniendo en cuenta que para la producción de briquetas, el óptimo debe ser inferior a 3 mm (Edison & Fernando, 2014).



**Figura 8:** Juego de mallas

*Fuente: Autores,(2015). Registro fotográfico*

### 2.1.3 Selección del mejor aglomerante.

Se desarrolló una prueba piloto, elaborando briquetas a partir de una de las tres biomásas residuales (algodón, cascarilla de arroz y tusa de maíz) seleccionada al azar y cada uno de los tres aglomerantes. Con el fin de determinar las propiedades que estos le aportan a las briquetas, y así establecer si existe uno que proporcione mejores propiedades a la mezcla o si es indistinto utilizar cualquiera de ellos. Para esto, se evaluaron propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad mecánica en las briquetas elaboradas con aglomerante de yuca, platano y maíz. Es importante mencionar, que las briquetas elaboradas tienen un porcentaje de aglomerante en la mezcla de 10 %.



## 2.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS A PARTIR DE PRUEBAS DE DURABILIDAD MECÁNICA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

### 2.2.1Diseño experimental

El diseño experimental se realizó en la versión 9 del software Design Expert, utilizando un modelo símplex reticular, típico para mezclas de 3 componentes (factores), con el fin de establecer una batería de ensayos.

**Tabla 1:** Factores y variables de respuesta

*Fuente: Autores (2015)*

FACTORES	VARIABLES DE RESPUESTA
Biomasa	Resistencia a la compresión
Aglomerante	Durabilidad mecánica
Carbón Mineral	Porcentaje de azufre
	Poder calorífico analítico

Fue necesario establecer los límites de porcentaje de los factores (Ver tabla 2), teniendo en cuenta el uso racional del aglomerante, ya que porcentajes altos de este, influenciarían de manera directa en el costo, complejidad y poder calorífico de la briqueta. Por otra parte, con la inclusión del carbón en la mezcla se buscó aprovechar la energía potencial de este sin afectar de sobremanera el ambiente, debido a su alto contenido de azufre, por tanto se trabajó con rangos medios en el contenido de carbón de la mezcla para así limitar el azufre presente en las briquetas. De igual forma, la biomasa

debe ser el factor que prime en la mezcla, por ello representa los valores superiores en los porcentajes.

**Tabla 2:** Límites de los porcentajes de factores en la mezcla.

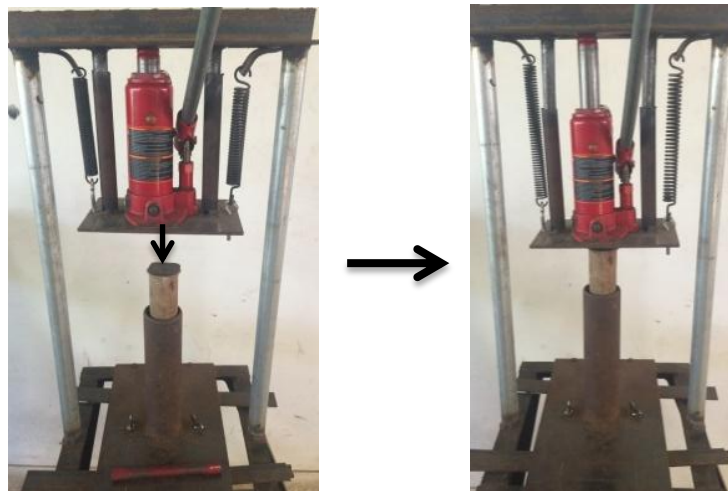
*Fuente: Autores (2015)*

VARIABLE	UNIDADES	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
Biomasa	%	40	95
Aglomerante	%	5	20
Carbón Mineral	%	0	40

Una vez se definieron los factores, variables de respuesta y límites, se realizó el diseño experimental de mezclas para las 3 biomásas residuales.

### 2.2.2 Máquina briquetadora

Luego de haber desarrollado el diseño experimental, se fabricó una máquina briquetadora tipo prensa, para elaborar los densificados (Ver figura 9).



**Figura 9:** Máquina briquetadora.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

Se adaptó un manómetro al gato hidráulico (Ver figura 10), para conocer su presión interna, que junto con el diámetro del vástago (30 mm), fue útil para calcular la fuerza que ejerce el gato sobre la biomasa al ser compactada en el cilindro y a partir de esta, la presión efectiva de compactación.



**Figura 10:** Máquina briquetadora (Adaptación del manómetro).

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

Se trabajó con una presión interna en el gato de 3000 Psi, traducida en una presión de compactación en el cilindro de aproximadamente 7 MPa. Cabe destacar, que la presión de compactación utilizada, está en el rango de presiones medias que van de 5 a 100 MPa para equipos de briquetado (Edison & Fernando, 2011).

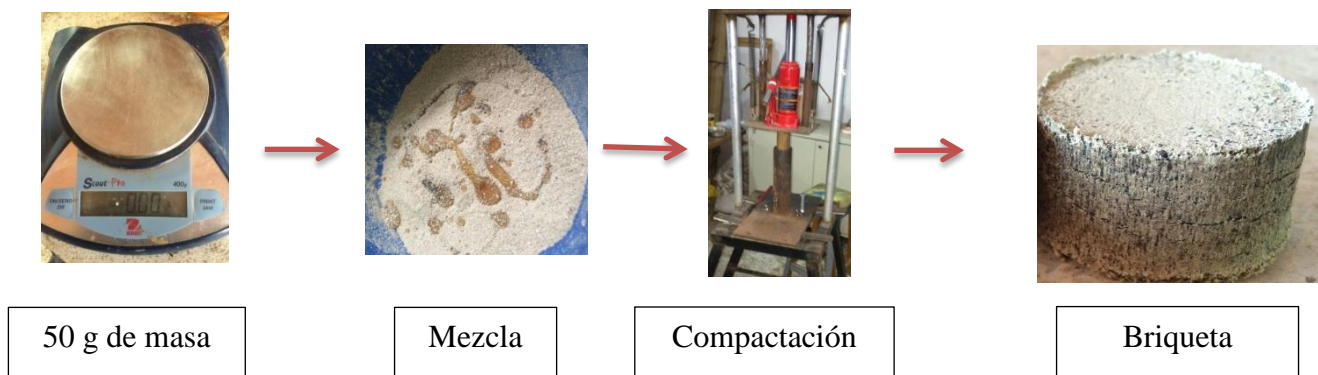
### **2.2.3Elaboración de briquetas**

Se elaboraron 4 briquetas por cada mezcla (corridas) del diseño experimental, de las cuales 2 briquetas se utilizaron para prueba de resistencia a la compresión y 2 para prueba de durabilidad mecánica. Cada briqueta se hizo considerando una masa de 50 g, un diámetro de 52 mm, una longitud de 60 mm, una presión de compactación de aproximadamente 7 MPa y un tiempo de sostenimiento de la carga de 10 minutos, la

briqueta fue retirada del equipo después de 3 minutos, con el fin de contrarrestar los efectos de expansión volumétrica tras liberar a la briqueta de la presión aplicada.

Los componentes de la mezcla se pesaron según los porcentajes del diseño experimental en una balanza de precisión, luego se mezclaron manualmente hasta obtener una mezcla homogénea y se compactaron en la máquina briquetadora (Ver figura 11).

Para retirar el exceso de humedad, las briquetas fueron secadas por convección natural durante tres días.



**Figura 11:** Proceso de elaboración de briquetas.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

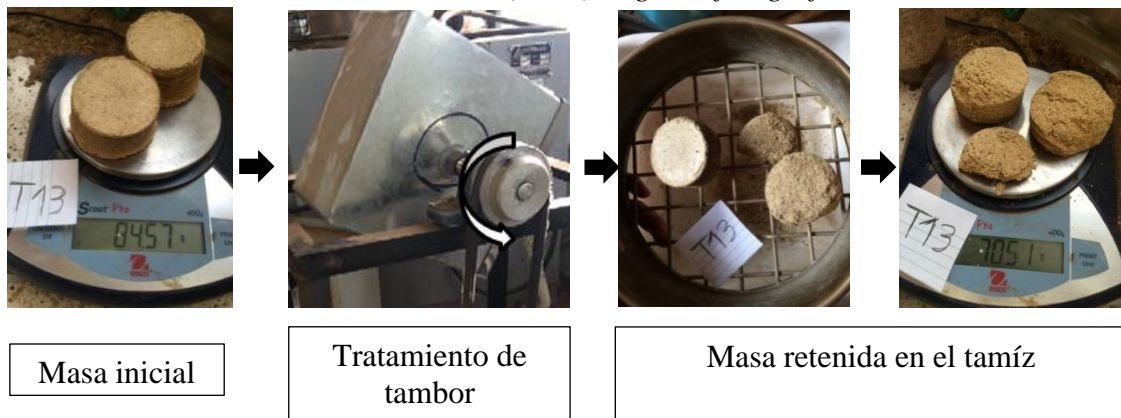
#### **2.2.4 Prueba de durabilidad mecánica.**

Esta prueba se realizó bajo la Norma CEN/TS 15210 parte dos briquetas, utilizando un equipo para pruebas de durabilidad mecánica disponible en la Universidad Pontificia Bolivariana (Ver figura 12), en la cual las briquetas se sometieron a golpes controlados entre sí y contra las paredes de una cámara rotativa que gira a una velocidad de 21 RPM durante 5 minutos. Posteriormente, las briquetas se hicieron pasar por un tamiz de una abertura aproximada de  $\frac{2}{3}$  el diámetro de la briqueta y calculamos la durabilidad mecánica como la relación entre la masa retenida en el tamiz después del tratamiento en la cámara rotativa y la masa inicial de las briquetas antes del tratamiento (Ver figura 13).



**Figura 12:** Máquina de durabilidad.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*



**Figura 13:** Prueba de durabilidad mecánica.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

Según la norma, el grado más alto de durabilidad (DU) corresponde a  $DU \geq 95\%$ , el valor medio en un rango de  $90\% < DU < 95\%$ , y se considera relativamente baja durabilidad mecánica a un porcentaje inferior a 90 %.

### 2.2.5 Prueba de resistencia a la compresión

Se utilizó una máquina de compresión inconfiada con una capacidad máxima de 223,7Kgf, presente en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana (Ver figura 14). Las briquetas se sometieron a una carga axial hasta su falla (Ver figura 15) y se calculó la resistencia a la compresión reemplazando la lectura del

dial en la ecuación (1), como lo establece el certificado de calibración de la máquina (Ver anexo G).

$$Carga\ en\ (Kgf) = A_0 + (A_1 * X) + (A_2 * X^2) + (A_3 * X^3) \quad (1)$$

Dónde:

X = Lectura del Dial

$$A_0 = -6,52218E - 01$$

$$A_2 = -6,40870E - 06$$

$$A_1 = 2,56124E - 01$$

$$A_3 = -1,33603E - 09$$

Desvío estándar del ajuste = 0,11763531 kgf



**Figura 14:** Máquina de compresión inconfiada.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

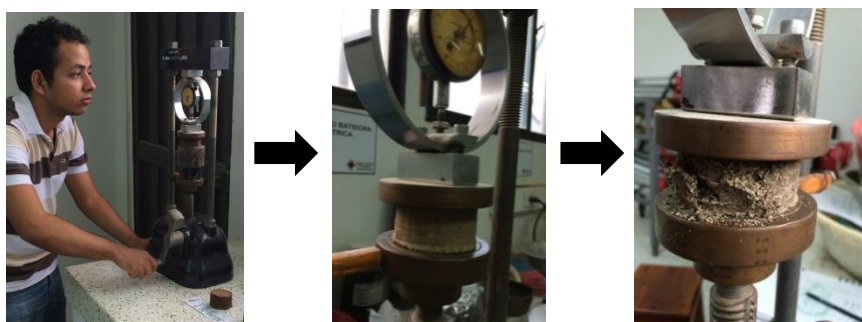
El criterio utilizado, para definir si una briqueta tiene buena resistencia a la compresión, se estableció de acuerdo a la norma técnica Colombiana NTC-2060 , que en su numeral 4.2.1, muestra el requerimiento de resistencia al aplastamiento que debe tener una briqueta combustible (Ver tabla 3).

**Tabla 3:** Requisitos de resistencia a la compresión.

*Fuente: Norma técnica NTC-2060 de briquetas combustibles, (2015).*

Masa (g/briqueta)	Carga de aplastamiento (Rm)	
	Newtons (N)	(Kgf)
60 o más	784,31	80
40	588,23	60
30	490,19	50
20	392,15	40

En este orden de ideas, teniendo en cuenta la NTC-2060 y que las briquetas elaboradas tienen una masa de 50 g, se encontró que estas deben soportar una carga de compresión de 70 Kgf.



**Figura 15:** Prueba de Resistencia a la compresión.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

## 2.3 MEZCLAS ÓPTIMAS

Para establecer las mezclas óptimas, fue necesario llevar a cabo los siguientes procedimientos.

### 2.3.1 Cálculo del poder calorífico y el porcentaje de azufre.

Se calculó el poder calorífico y porcentaje de azufre de las corridas del diseño experimental de cada biomasa, teniendo en cuenta el porcentaje en peso de cada factor,

así como el poder calorífico y porcentaje de azufre obtenidos con el análisis elemental y próximo de las biomásas y el carbón.

Se definieron las siguientes expresiones para el cálculo del poder calorífico de las mezclas de cada experimento (Tusa de maíz, residuos de algodón y cascarilla de arroz), basados en la metodología utilizada por (Sakurai Kunitoshi, 2009) para la caracterización de residuos sólidos. De esta manera, se realiza la sumatoria de los productos entre los aportes energéticos de cada factor (Biomasa, carbón y aglomerante), y el contenido de estos elementos en la mezcla.

$$PC_T = [15,88 * B(\%)] + [23,93 * C(\%)] + [10,34 * Ag(\%)] \quad (2)$$

$$PC_A = [17,9 * B(\%)] + [23,93 * C(\%)] + [10,34 * Ag(\%)] \quad (3)$$

$$PC_C = [15,81 * B(\%)] + [23,93 * C(\%)] + [10,34 * Ag(\%)] \quad (4)$$

Dónde:

$PC$  = Poder calorífico de cada mezcla (subíndices T, A y C para mezclas a base tusa de maíz, algodón y cascarilla de arroz respectivamente).en MJ/Kg

$B(\%)$  = Porcentaje en masa de biomasa en la mezcla

$C(\%)$  = Porcentaje en masa de carbón en la mezcla

$Ag(\%)$  = Porcentaje en masa de aglomerante en la mezcla

Análogamente, se calcularon los porcentajes de azufre de cada mezcla en los tres experimentos, realizando la sumatoria de los productos del porcentaje de azufre de cada factor y el contenido de estos en la mezcla.

$$\%S_T = [0,09 * B(\%)] + [1,55 * C(\%)] + [0 * Ag(\%)] \quad (5)$$

$$\%S_A = [0,2 * B(\%)] + [1,55 * C(\%)] + [0 * Ag(\%)] \quad (6)$$

$$\%S_C = [0,1 * B(\%)] + [1,55 * C(\%)] + [0 * Ag(\%)] \quad (7)$$



Dónde:

$\%S$  = contenido de azufre de cada mezcla (subíndices T, A y C para mezclas a base tusa de maíz, algodón y cascarilla de arroz respectivamente).en porcentaje.

### **2.3.2 Análisis de datos**

Para encontrar las mezclas más favorables de cada biomasa, se utilizaron los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas, el porcentaje de azufre y el poder calorífico de las mezclas calculado mediante un método determinístico (Ver sección 2.3.1). Estos datos, se analizaron por medio de la versión 9 del software Design Expert, a partir de un modelo cúbico, debido a su capacidad para determinar el comportamiento de un experimento con tres factores, así pues, se generaron modelos de regresión experimental para la resistencia a la compresión y la durabilidad, que a su vez fueron usados por el método de superficie de respuesta (RMS) para optimizar las mezclas mediante la interacción de los factores del modelo y la minimización o maximización de una función multiobjetivo, ajustada a una determinada deseabilidad en torno a los factores y variables de respuesta, permitiendo así establecer las mezclas más favorables, que cumplieron los criterios establecidos.

Con las superficies de respuesta establecidas, se puede observar la interacción de los tres factores y las variables de respuesta mencionadas con antelación. También, se pudo determinar si existe o no algún tipo de relación entre las propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad mecánica de cada experimento. Asimismo, se analizó la precisión en la predicción de valores de durabilidad y resistencia a la compresión a partir del modelo de regresión.

### **3. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en todas las fases de la metodología desarrollada.

### 3.1 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LA CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICAS

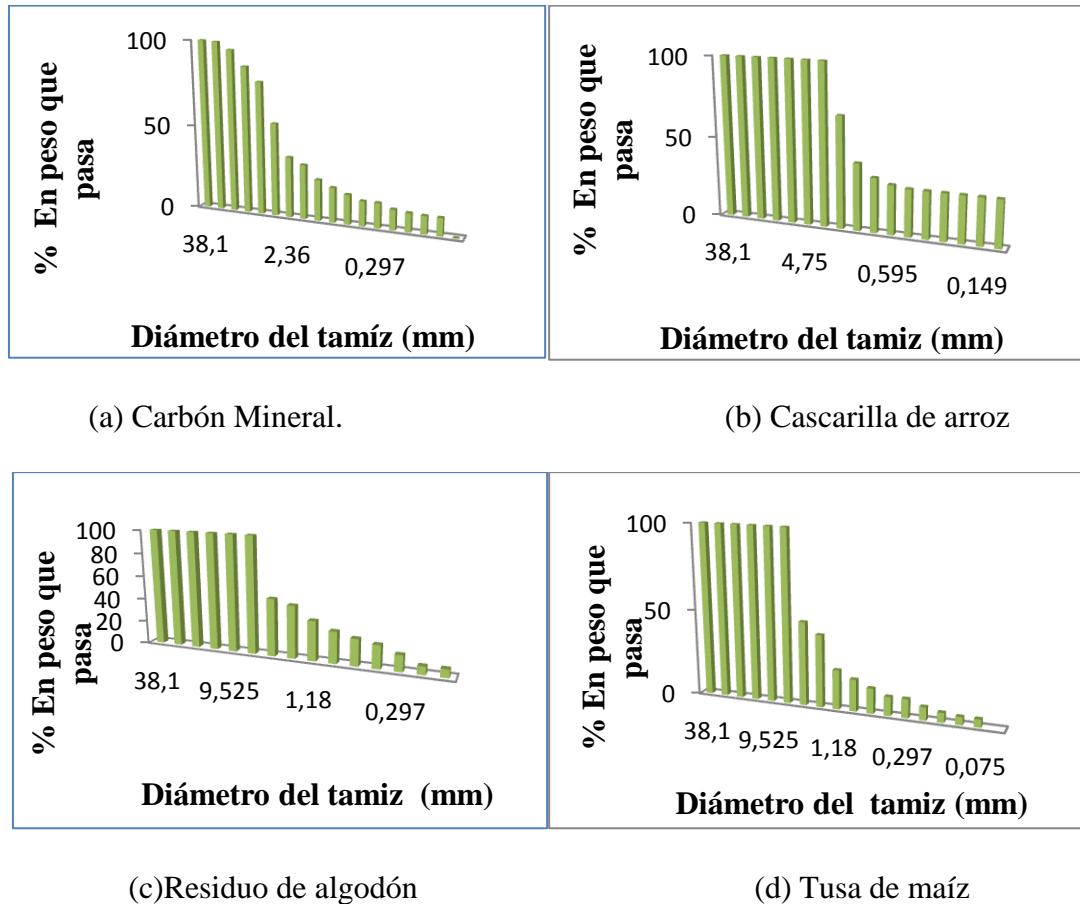
En la tabla 4, se observan los resultados de los análisis próximo y elemental que se aplicaron a las tres biomásas residuales y el carbón mineral, donde se tuvo especial atención en el porcentaje de azufre y poder calorífico de las materias primas.

**Tabla 4:** Resultados de análisis próximo y elemental de materias primas.

*Fuente: Autores, (2015).*

<b>Muestra</b>	<b>Humedad residual (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>	<b>Materia volátil (%)</b>	<b>Carbono fijo (%)</b>	<b>Azufre Total (%)</b>	<b>Poder Calorífico superior (Cal/g)</b>	<b>%C</b>	<b>%H</b>	<b>%N</b>
<b>Tusa de maíz</b>	10,52	7,71	65,23	16,54	0,09	3792	39,95	4,97	0,60
<b>Cascarilla de arroz</b>	10,18	8,33	64,67	16,82	0,10	3777	39,27	4,91	0,59
<b>Residuo de algodón</b>	10,51	5,44	68,42	15,63	0,20	4276	39,30	4,70	1,21
<b>Carbón mineral</b>	12,52	3,96	43,54	39,98	1,55	5715	60,29	4,61	1,47

Después de triturar la materia prima, se efectuó el proceso de tamizado a partir del cual se obtuvieron las siguientes gráficas de distribución granulométrica de cada biomasa y el carbón. Esta información es de gran importancia, ya que el tamaño de partículas influye sobre las características y propiedades de compactación de la materia prima.



1,18mm porque la tendencia a la adhesión aumenta, cuando disminuye el tamaño de partícula, ya que también disminuye la profundidad de las arrugas y se facilita los puntos de contacto (Edison & Fernando, 2011). Ahora, respecto a las gráficas obtenidas a partir del ensayo de distribución granulométrica, se pudo observar que para la tusa de maíz, logra pasar por el tamiz de 1,18 mm, aproximadamente el 40% del material, pues se generan dos tipos de morfología tras la molienda, una de tipo arenosa que es la que pasa por el tamiz y otra granular que no es apta para elaborar briquetas y corresponde al 45% del material restante o retenido. De igual forma, el 30% del residuo de algodón logra pasar por el tamiz de 1,18 mm, mientras que el 70 % restante, es la mota del algodón, cuya morfología no logra pasar por el tamiz, pero de acuerdo a experimentación si es apta para hacer briquetas, logrando así, un máximo aprovechamiento de este residuo. Para la cascarilla de arroz en su estado natural, pasa poco más del 60 % por el tamiz de 2 mm, pero como podemos observar en la figura 18, no es posible elaborar briquetas bajo las condiciones de la máquina briquetadora diseñada, con este tipo de granulometría (Ver figura 16), y en su defecto fue necesario someter a la cascarilla de arroz a un proceso de molienda, para trabajar con un tamaño de grano menor de 1,18 mm.

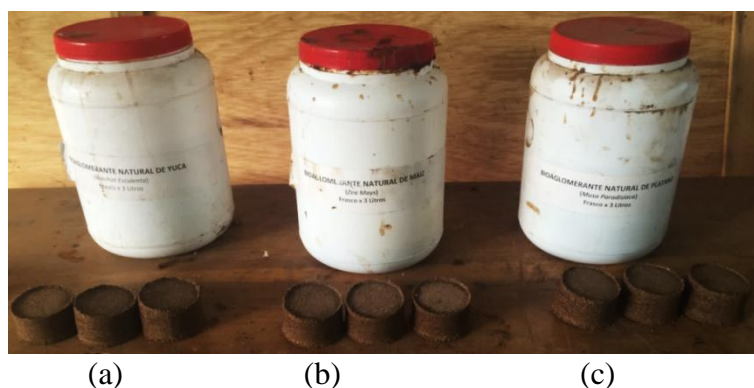


**Figura 16:** Briquetas de cascarilla de arroz en estado natural.

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

### 3.2 SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE.

Se seleccionó el residuo de algodón, para elaborar las briquetas con cada aglomerante (Ver figura 17), de donde, dos de las briquetas fueron sometidas a prueba de durabilidad mecánica y la restante se utilizó para hacer una prueba de resistencia a la compresión (Ver anexo A).



**Figura 17:** Briquetas para selección del mejor aglomerante: (a) Aglomerante de yuca, (b) Aglomerante de maíz, (c) Aglomerante de plátano

*Fuente: Autores, (2015) Registro fotográfico.*

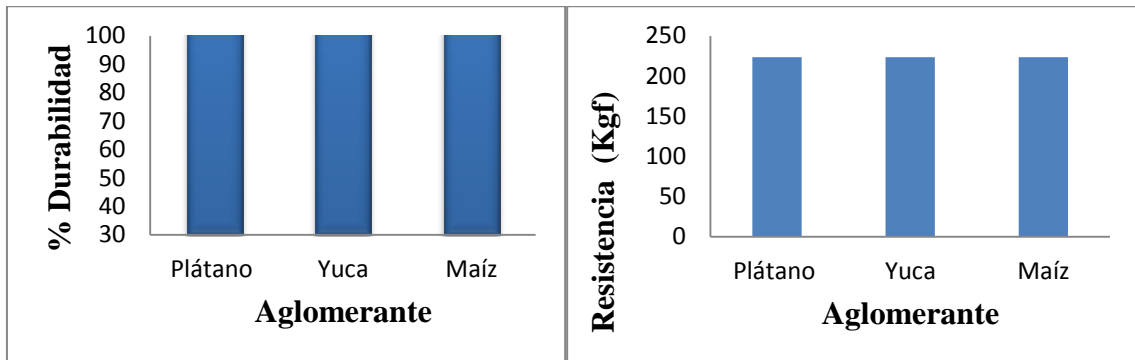
En la tabla 5, se observan los valores obtenidos en las pruebas mecánicas de las briquetas hechas con los tres aglomerantes.

**Tabla 5:** Resultados de pruebas mecánica (Selección del mejor aglomerante)

*Fuente: Autores, (2015)*

Aglomerante	Biomasa	Masa inicial (g)	Masa retenida (g)	% Durabilidad	Resistencia a la compresión (Kgf)
Plátano	Algodón	94,43	89,35	94,62	223,69
Yuca	Algodón	94,79	90,24	95,2	223,69
Maíz	Algodón	94,21	90,17	95,71	223,69

Estas pruebas mecánicas desarrolladas a briquetas hechas con tres diferentes tipos de aglomerante (Yuca, Plátano y Maíz), arrojaron un dato particular, y es que los valores obtenidos en las dos pruebas fueron prácticamente iguales para los tres aglomerantes, de manera que, es indistinto utilizar cualquiera de ellos y le aportan las mismas propiedades a las briquetas (ver gráfico 2).



**Gráfico 2:** Prueba de durabilidad y resistencia a la compresión (Selección del mejor aglomerante).

*Fuente: Autores, (2015).*

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo seleccionar cualquiera de los tres aglomerantes, sin embargo, a partir de los aglomerantes a base de Maíz y Yuca se obtuvieron ligeramente mejores resultados de durabilidad.

Con base en lo anterior, se seleccionó el bioaglomerante de yuca, debido a su fácil consecución y fabricación.

### 3.3DISEÑO EXPERIMENTAL

Basado en los límites establecidos en el porcentaje de los factores, se obtuvo la siguiente batería de ensayos, con un total de 16 corridas, dónde se nombró de T1 hasta T16 las briquetas con biomasa de tusa de maíz, de C1 a C16 las que contienen cascarilla de arroz y de A1 a A16 las briquetas con residuo de algodón, es de resaltar que el aglomerante

que se utilizó en los experimentos, corresponde al seleccionado en la sección 3.2 (Ver tabla 6).

**Tabla 6:** Diseño experimental de mezclas (Batería de ensayo).

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 8 (2015)*

Mezcla	Corridas	Composición de la briqueta [% Masa]		
		Aglomerante (%)	Biomasa (%)	Carbón (%)
T1-C1-A1	1	15	85	0
T2-C2-A2	2	20	53.33	26.67
T3-C3-A3	3	10	50	40
T4-C4-A4	4	8.75	61.25	30
T5-C5-A5	5	5	68.33	26.67
T6-C6-A6	6	20	66.67	13.33
T7-C7-A7	7	10	90	0
T8-C8-A8	8	16.25	53.75	30
T9-C9-A9	9	8.75	81.25	10
T10-C10-A10	10	20	40	40
T11-C11-A11	11	15	45	40
T12-C12-A12	12	5	95	0
T13-C13-A13	13	16.25	73.75	10
T14-C14-A14	14	5	55	40
T15-C15-A15	15	20	80	0
T16-C16-A16	16	5	81.67	13.33



### 3.4BRIQUETAS

Utilizando la máquina briquetadora, se elaboraron las briquetas de cada biomasa según los porcentajes de la batería de ensayo y las condiciones de operación de la máquina (Ver figura 18-19-20).

#### 3.4.1 Briquetas de tusa de maíz



**Figura 18:** Briquetas de tusa de maíz.

*Fuente: Autores, (2015)*

#### 3.4.2Briquetas de residuo de algodón



**Figura 19:** Briquetas de residuo de algodón.

*Fuente: Autores, (2015).*

#### 3.4.3 Briquetas de cascarilla de arroz



**Figura 20:** Briquetas de cascarilla de arroz.

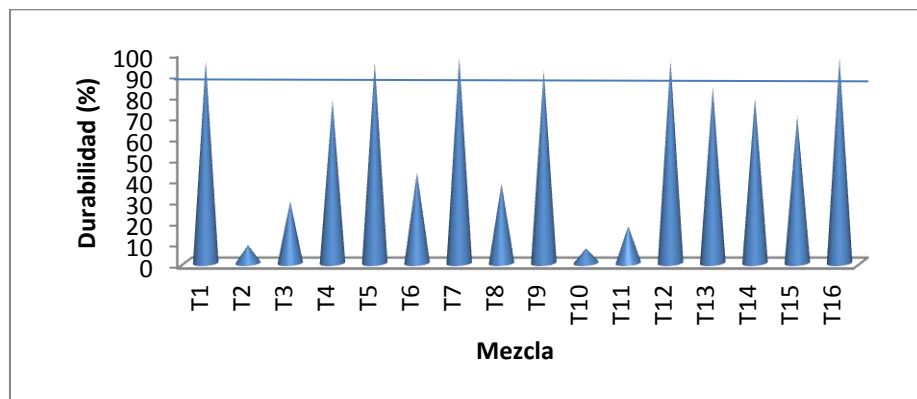
*Fuente: Autores, (2015).*

### 3.5 RESULTADOS DE PRUEBAS DE DURABILIDAD MECÁNICA Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

En los siguientes gráficos, se puede observar los resultados de las pruebas mecánicas desarrolladas a las briquetas hechas con tusa de maíz, algodón y cascarilla de arroz (Ver registro fotográfico de las pruebas en Anexos B y C).

#### 3.5.1 Tusa de maíz

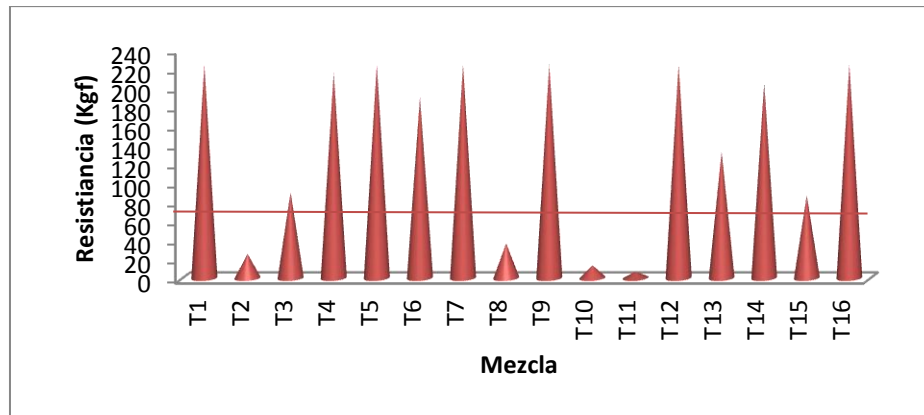
Con respecto a la durabilidad mecánica, se concluye que las mezclas T1, T5, T7, T9, T12 Y T15 lograron sobrepasar un porcentaje de 90 %, que según la norma corresponde a valores aceptables de durabilidad, siendo 97,3 % el valor más alto de durabilidad en las briquetas de tusa de Maíz, alcanzado por la mezcla T7 (Ver gráfico 3).



**Gráfico 3:** Resultados de durabilidad (Tusa de maíz).

*Fuente: Autores, (2015).*

Se encontró que el 75 % de las mezclas superó la resistencia de 70 Kgf necesaria para briquetas de 50 g, incluyendo las que obtuvieron buenos porcentajes de durabilidad (Ver gráfico 4).

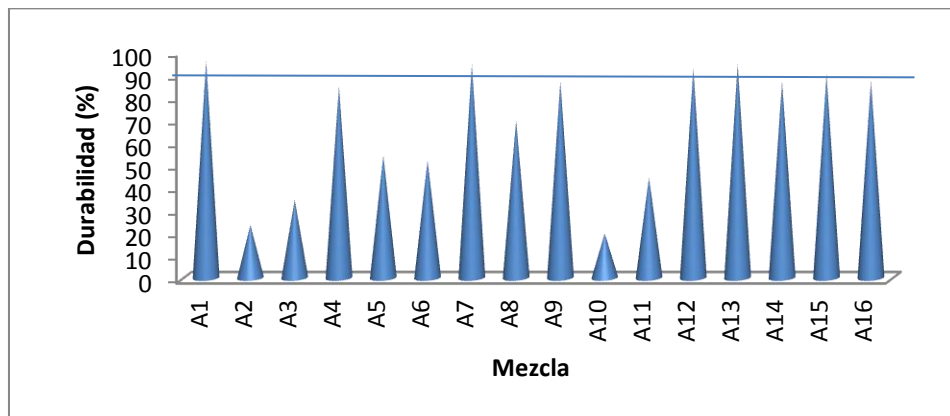


**Gráfico 4:** Resultados de resistencia a la compresión (Tusa de maíz).

*Fuente: Autores, (2015).*

### 3.5.2 Algodón

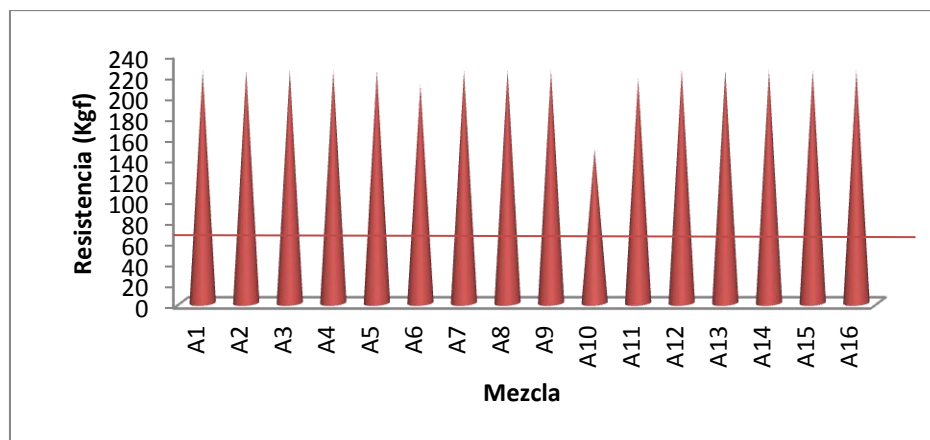
Con el residuo de algodón, se logró obtener que las mezclas A1, A7, A12, A13 Y A15 alcanzaran valores de durabilidad superiores a 90 %, siendo 95,78 % la durabilidad más alta, alcanzada con la mezcla A1 (Ver gráfico 5).



**Gráfico 5:** Resultados de durabilidad (Algodón).

*Fuente: Autores, (2015).*

En el caso de la prueba de resistencia a la compresión, todas las mezclas superaron el umbral de 70 kgf, sin embargo no todas tienen una buena durabilidad (Ver Gráfico 6).

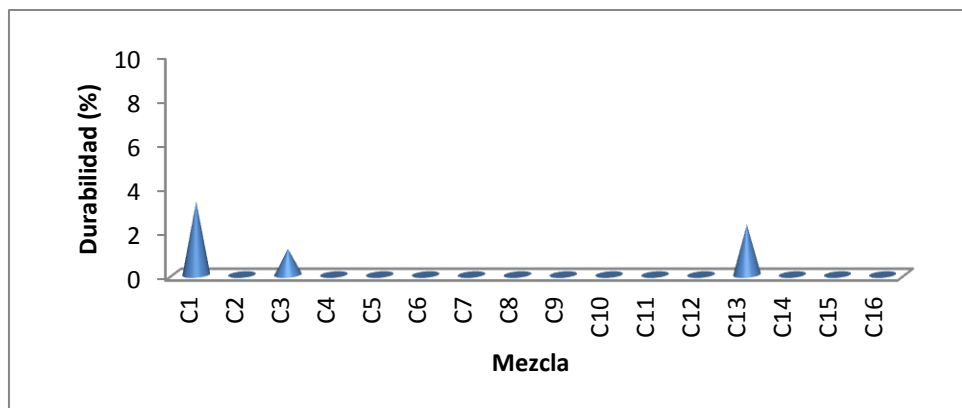


**Gráfico 6:** Resultados de resistencia a la compresión (Algodón).

*Fuente: Autores, (2015).*

### 3.5.3 Cascarilla de arroz

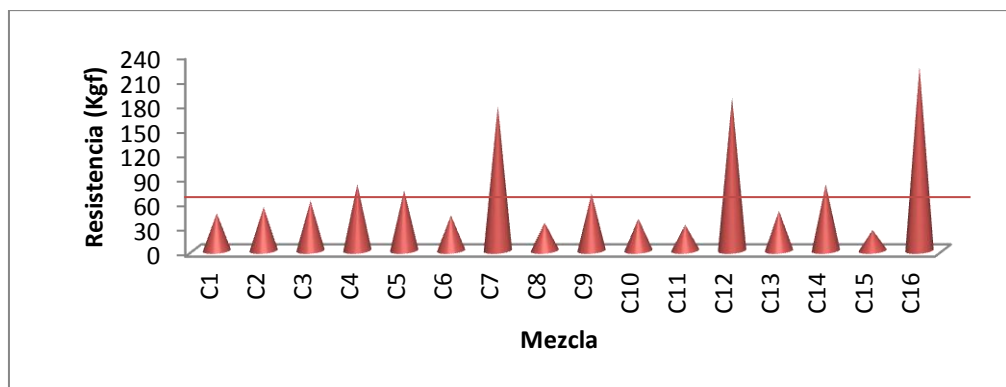
Los resultados de las pruebas mecánicas con la cascarilla de arroz, no fueron favorables, como se puede apreciar en el gráfico 7 y 8, donde ninguna mezcla logró tener una durabilidad superior a 90 %, siendo 3,32% el valor máximo de durabilidad alcanzado por la mezcla C1 (Ver gráfico 7).



**Gráfico 7:** Resultados de durabilidad (Cascarilla de arroz).

*Fuente: Autores, (2015).*

Los resultados de la resistencia a la compresión, en general fueron bajos y solo seis mezclas superaron 70 Kgf (Ver gráfico 8).



**Gráfico 8:** Resultados de resistencia mecánica (Cascarilla de arroz).

*Fuente: Autores, (2015).*

En conclusión, la tusa de maíz tuvo un promedio de durabilidad de 63,93 % Y 6 mezclas superaron el umbral de 90 %, en comparación con el residuo de algodón, que tuvo una durabilidad promedio de 69,27 % Y 5 mezclas con más de 90 % de durabilidad. Con la cascarilla de arroz no se lograron obtener durabilidades mayores a 90 %.

Respecto a la resistencia a la compresión, los mejores resultados se obtuvieron con el residuo de algodón, donde el 100% de las mezclas superó una resistencia de 70 Kgf, seguida por la tusa de maíz donde el 75 % de las mezclas superaron dicho valor y la cascarilla de arroz con solo el 37,5%.

Es importante el hecho, de que existe una relación entre la durabilidad mecánica y la resistencia a la compresión en la tusa de maíz, puesto que, se puede apreciar que briquetas con altos valores de resistencia, presentan también aceptables valores de durabilidad, a diferencia del residuo de algodón, donde no se evidencia una relación entre estas dos variables de respuesta.

### 3.6 MÉZCLAS ÓPTIMAS.

#### 3.6.1 Poder calorífico y porcentaje de azufre de las mézclas.

Se calcularon estas variables de respuesta, según lo indica la metodología y se tabularon junto a los valores de durabilidad y resistencia de cada mezcla (Ver tabla 11-12-13 en Anexos D).

#### 3.6.2 Análisis de resultados experimentales

##### 3.6.2.1 Tusa de Maíz

En la siguiente tabla, se muestra un resumen, donde se relacionan los valores máximos y mínimos que se obtuvieron para cada una de las variables de respuesta, así como sus promedios y las desviaciones estándar de cada conjunto de datos.

**Tabla 7:** Resumen de resultados de las variables de respuesta (tusa de maíz).

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std Dev.
Durabilidad	%	16	Polynomial	7,07	97,30	63,93	34,18
Resistencia	Kgf	16	Polynomial	6,51	223,69	146,44	88,19
Poder Calorífico	Mj Kg-1	16	Polynomial	14,77	18,82	16,8	1,32
% Azufre	%	16	Polynomial	0,07	0,67	0,37	0,23

##### 3.6.2.1.1 Modelo de regresión para la durabilidad mecánica

El modelo de regresión que predice la durabilidad de las briquetas a base de tusa de maíz, aglomerante de yuca y carbón, en función del porcentaje en peso de cada uno de estos componentes, es la siguiente:

- Ecuación final en término de componentes reales

$$\begin{aligned}
 \text{Durabilidad} = & -25450,23 \times \text{Aglomerante} + 101,83 \times \text{Biomasa} - 143,45 \times \text{Carbón} \\
 & + 41849,85 \times \text{Aglomerante} \times \text{Biomasa} + 45861,57 \times \text{Aglomerante} \\
 & \times \text{Carbón} + 671,17 \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} - 43380,99 \times \text{Aglomerante} \\
 & \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} + 16858,99 \times \text{Aglomerante} \times \text{Biomasa} \\
 & \times (\text{Aglomerante} - \text{Biomasa}) + 22381,93 \times \text{Aglomerante} \times \text{Carbón} \\
 & \times (\text{Aglomerante} - \text{Carbón}) - 4,23 \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} \times (\text{Biomasa} \\
 & - \text{Carbón})
 \end{aligned}$$

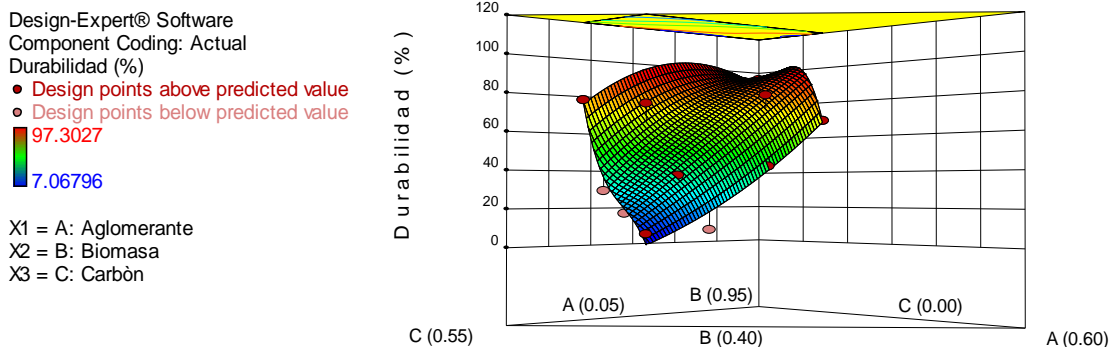
*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

En el anexo E1, se muestra la gráfica de los valores de respuesta predichos frente a los valores de respuesta actuales de durabilidad, mediante la que se pudo concluir que el modelo ofrece una buena aproximación y predicción de los valores de durabilidad mecánica para briquetas de tusa, ya que se obtuvo un coeficiente de determinación de 0,97 en una escala de 0 a 1, indicando la calidad del modelo para replicar los resultados.

#### **3.6.2.1.2 Análisis de superficie de respuesta para la durabilidad**

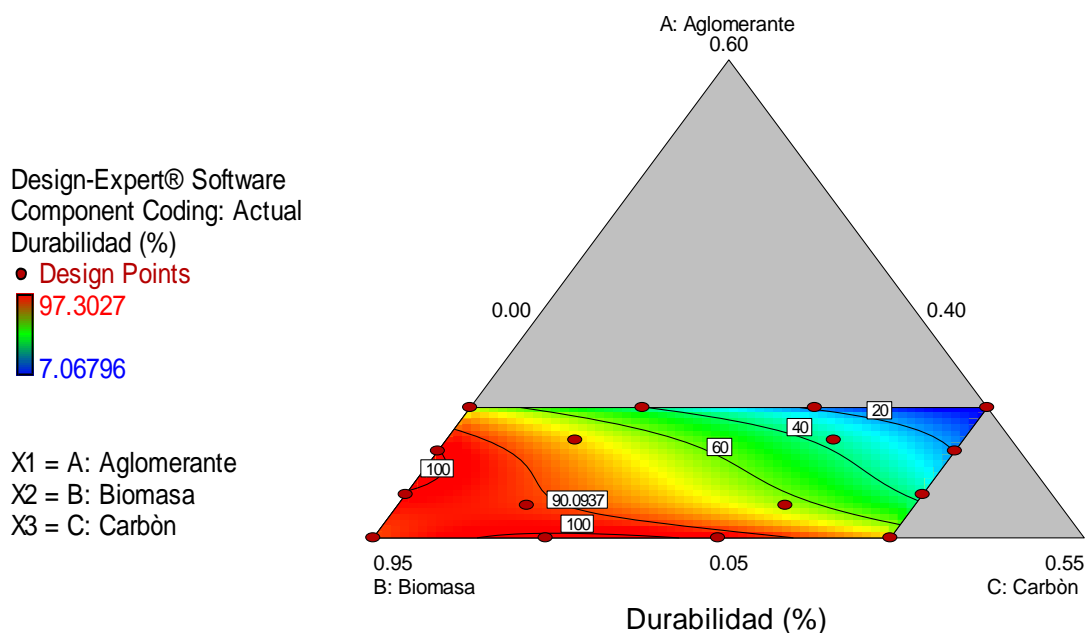
El método de superficie de respuesta (RSM), consiste en un conjunto de procedimientos matemáticos y estadísticos que sirven para analizar fenómenos o experimentos en los que una o varias variables de interés son influenciadas por otra(s). Así entonces, se le conoce como superficie de respuesta, a la relación entre las variables de respuesta y los niveles de los factores de un experimento.

Las gráficas de contorno son una herramienta que ayudan al análisis de la forma tridimensional de la superficie de respuesta, a partir de las llamadas líneas de contorno, las cuales atienden a valores constantes de la variable de respuesta respecto a los niveles de los factores.



**Gráfico 9:** Superficie de respuesta para la durabilidad en briquetas de tusa de maíz.

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*



**Gráfico 10:** Gráfico de contorno para la durabilidad en briquetas de tusa de maíz.

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

En la superficie de respuesta y el gráfico de contorno para la durabilidad de la tusa de maíz que se muestran en los gráficos 9 y 10 respectivamente, es notable el hecho de que la durabilidad mecánica de las briquetas aumenta en la medida en que el contenido de biomasa de estas se acerca a su valor máximo (95%), sin embargo los mayores valores



de durabilidad no se logran en las briquetas con un 95% de contenido de tusa, si no que estos valores se obtienen a partir de contenidos de carbón de 7 a 25% y una adición de aglomerante inferior a 6%, lo cual indica que se pueden obtener densificados de excelente durabilidad (DU entre 95 y 100%), usando hasta un mínimo de 70% de biomasa en la mezcla.

Se encontró también que es imposible obtener briquetas durables (DU mayor a 90%) usando porcentajes superiores a 32% de carbón mineral en las mezclas, sin importar que proporciones de biomasa y aglomerante sean utilizados. Análogamente al usar cantidades superiores a un 18% de aglomerante en la mezcla, no es posible obtener una durabilidad aceptable en los densificados.

#### **3.6.2.1.2 Modelo de regresión para la resistencia a la compresión**

El modelo de regresión que predice la resistencia a la compresión de las briquetas a base de tusa de Maíz, aglomerante de Yuca y Carbón, en función del porcentaje en peso de cada uno de estos componentes, es la siguiente:

- Ecuación final en término de componentes reales

$$\begin{aligned} \text{Resistencia} = & 71429,08 \times \text{Aglomerante} - 3,37 \times \text{Biomasa} + 1949,6 \times \text{Carbón} - 1,24 \times \text{Aglomerante} \\ & \times \text{Biomasa} - 1,17 \times \text{Aglomerante} \times \text{Carbón} - 2546 \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} + 99207,11 \\ & \times \text{Aglomerante} \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} - 59444,03 \times \text{Aglomerante} \times \text{Biomasa} \\ & \times (\text{Aglomerante} - \text{Biomasa}) - 30651,25 \times \text{Aglomerante} \times \text{Carbón} \\ & \times (\text{Aglomerante} - \text{Carbón}) + 1528,02 \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} \times (\text{Biomasa} - \text{Carbón}) \end{aligned}$$

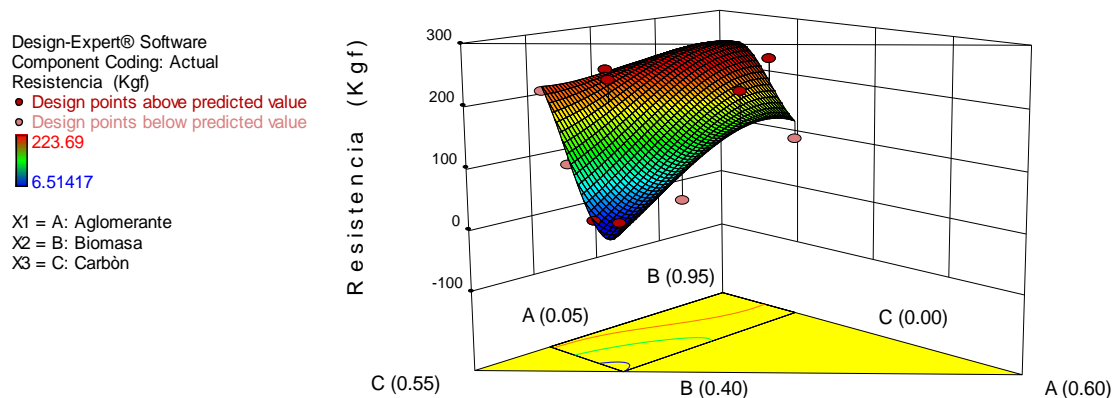
***Fuente:*** Autores, *Design Expert Versión 9 (2015)*

En el anexo E2 encontramos el gráfico que relaciona los valores de respuesta predichos frente a los valores de respuesta actuales, permitiendo analizar la precisión del modelo de regresión en cuanto a la predicción de los valores de resistencia a la compresión de las briquetas a base de tusa de maíz, de donde se puede concluir que el modelo presenta

una aceptable aproximación en los valores predichos, con un coeficiente de determinación de 0,87 bastante cercano a 1.

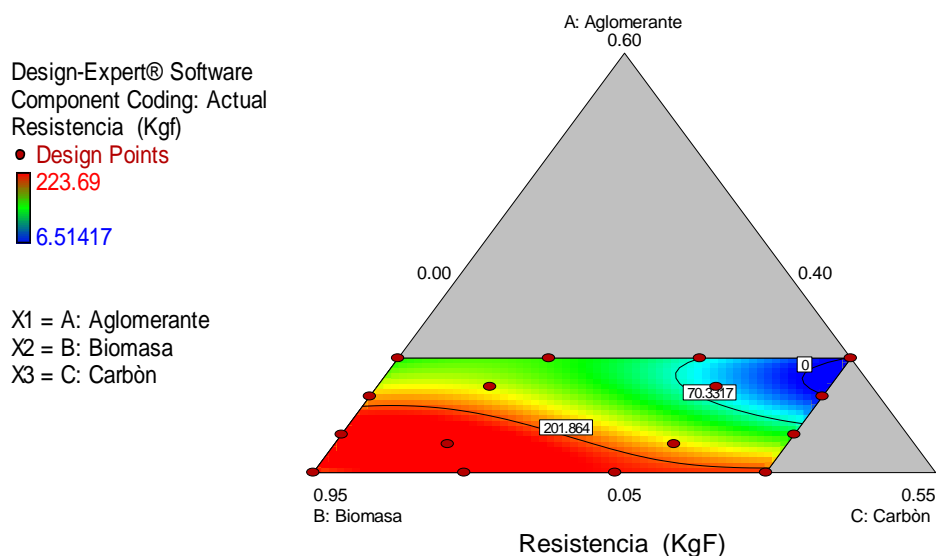
### 3.6.2.1.3 Superficie de respuesta para resistencia a la compresión

Según lo indicado por los gráficos 11 y 12, al igual que la durabilidad, la resistencia a la compresión de las briquetas hechas a base tusa de maíz, tiene la tendencia a aumentar a medida que el porcentaje de biomasa en la mezcla es mayor. Además, se pudo determinar que siempre será posible obtener una resistencia a la compresión aceptable (mayor que 70KgF, según la norma técnica Colombiana NTC-2060 de briquetas combustibles) en las briquetas fabricadas con contenidos de biomasa superiores a 57%, sin importar las concentraciones de aglomerante y carbón entre los límites establecidos para el diseño experimental. De igual manera siempre se conseguirán densificados resistentes, usando cantidades de carbón y aglomerante inferiores a 25 y 11% de contenido en la mezcla respectivamente.



**Gráfico 11:** Superficie de respuesta de la resistencia a la compresión en briquetas de tusa de maíz.

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

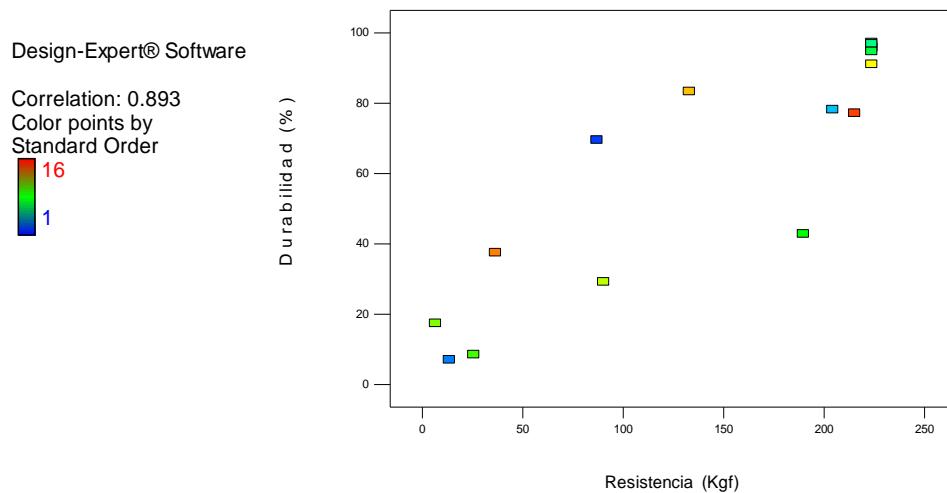


**Gráfico 12:** Gráfico de contorno para la resistencia a la compresión en briquetas de tusa de maíz.

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

#### 3.6.2.1.4 Relación entre la durabilidad y resistencia a la compresión

Un resultado importante, se presenta a partir de la gráfica durabilidad vs resistencia, generada a partir de los resultados para la tusa de maíz (ver gráfico 13), en la cual se puede ver con claridad que hay una relación fuerte entre estas dos variables (Covarianza positiva), obteniendo una correlación alta de 0,893, es decir, que si se obtiene una briqueta con una durabilidad mecánica aceptable, muy probablemente esta también cuenta con condiciones favorables de resistencia a la compresión, sin embargo no sucede lo contrario, es decir, una briqueta con una buena resistencia, no garantiza una durabilidad aceptable.



**Gráfico 13:** Durabilidad vs resistencia en briquetas de tusa de maíz.

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

### 3.6.2.1.5 Mezclas óptimas para tusa de maíz

Para la determinación de las mezclas óptimas de las briquetas a base de tusa de maíz, se tomaron como referencia los comportamientos de las variables de respuesta experimentales frente a variaciones en los factores, además del objetivo inicial de la investigación, los cuales fueron de gran importancia para determinar la deseabilidad del modelo de optimización. De esta manera, se definió minimizar el contenido de aglomerante en la mezcla y maximizar el contenido de biomasa.

Con el fin de aumentar el poder calorífico de las briquetas, por encima del poder calorífico de la biomasa pura (15,9MJ/Kg) se decidió maximizar el contenido de carbón, sin embargo se hace necesario controlar el incremento de este factor debido a que también aumenta el porcentaje de azufre de las mezclas, por ello se definió minimizar el porcentaje de azufre de estas.

Por último, se fijó la deseabilidad de la durabilidad y la resistencia en rangos de valores que garantizaron briquetas de calidad según la normatividad (Ver tabla 8).

**Tabla 8:** (a) Parámetros de optimización (b) Mézclas óptimas*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9(2015)***(a)**

		<b>Lower</b>	<b>Upper</b>	<b>Lower</b>	<b>Upper</b>	
<b>Name</b>	<b>Goal</b>	<b>Limit</b>	<b>Limit</b>	<b>Weight</b>	<b>Weight</b>	<b>Importance</b>
A: Aglomerante	Minimize	0,05	0,2	1	1	3
B: Biomasa	Maximize	0,4	0,95	1	1	3
C: Carbón	Maximize	0	0,4	1	1	3
Durabilidad	Is in range	90	97,3	1	1	3
Resistencia	Is in range	70	223,69	1	1	3
Poder Calorífico	Maximize	14,77	18,82	1	1	3
% Azufre	Minimize	0,07	0,67	1	1	3

**(b)**

<b>Solutions</b>									
<b>Number</b>	<b>%Agl.</b>	<b>% Biomasa</b>	<b>%Carbón</b>	<b>Durabilidad (%)</b>	<b>Resistencia (Kgf)</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/Kg)</b>	<b>% azufre</b>	<b>Deseabilidad</b>	
1	0,05	0,71	0,24	97,3	223,7	17,5	0,43	0,61	<b>Selected</b>
2	0,05	0,68	0,27	97,3	219,7	17,76	0,5	0,6	
3	0,05	0,91	0,04	96,4	223,7	15,92	0,143	0,47	
4	0,11	0,79	0,1	90	223,7	16,021	0,22	0,47	
5	0,14	0,79	0,07	90	193,05	15,64	0,18	0,4	

Según los criterios de deseabilidad establecidos, fueron halladas cinco posibles soluciones, donde el software recomienda seleccionar la mezcla número 1. No obstante, dependiendo de los resultados que se quieran obtener, es posible elegir cualquiera de ellas. Es de recalcar el hecho de que la mezcla número 5 no supera en poder calorífico a la biomasa pura, por lo que energéticamente no cumple con el objetivo, sin embargo esta mezcla logra mantener el 98,5% del poder calorífico de la biomasa pura, además de poseer un muy bajo porcentaje de azufre en comparación con las demás mezclas, de igual forma, la 3 y 4, no lograron un aumento significativo en el poder calorífico, siendo este de 0,27 y 0,9% respectivamente.

Todas las soluciones tienen valores de sus propiedades mecánicas dentro de los considerados aceptables para briquetas, ahora bien, en términos energéticos la mezcla 1

y 2 presentaron un aumento importante en cuanto a poder calorífico de 10,25% y 11,85% respectivamente, producto de un mayor porcentaje de carbón en la mezcla, sin embargo, este mayor aumento en el contenido de carbón, también representa un mayor porcentaje de azufre, aunque ninguna de las dos soluciones supere los límites en contenido de azufre, planteados por normativas ambientales (Ver anexo F), donde según la resolución 623 de 1998 del ministerio de ambiente Colombiano, con una vigencia a partir del 2006, los carbones y sus mezclas que se utilicen en la costa atlántica como combustible, deberán cumplir con un porcentaje de azufre inferior al 1%. En consecuencia, según los criterios establecidos en este estudio, fueron seleccionadas las mezclas 1 y 2 como óptimas, ya que presentaron los mejores resultados en cuanto a durabilidad y resistencia a la compresión, además de un aumento significativo del poder calorífico de la mezcla y un porcentaje de azufre dentro de la normatividad (Ver tabla 8–b).

### 3.6.2.2 Residuo de algodón

En la siguiente tabla, se muestra un resumen donde se relacionan los valores máximos y mínimos que se obtuvieron para cada una de las variables de respuesta, así como sus promedios y las desviaciones estándar de cada conjunto de datos.

**Tabla 9:** Resumen de resultados de las variables de respuesta (Residuo de algodón).

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std Dev.
Durabilidad	%	16	Polynomial	19,64	95,78	69,27	27,10
Resistencia	Kgf	16	Polynomial	148,2	223,69	217,63	18,90
Poder Calorífico	Mj Kg-1	16	Polynomial	16,4	19,93	18,16	1,06
% Azufre	%	16	Polynomial	0,16	0,73	0,45	0,21

### 3.6.2.2.1 Modelo de regresión para durabilidad mecánica

El modelo de regresión que predice la durabilidad de las briquetas a base de residuo de algodón, aglomerante de yuca y carbón, en función del porcentaje en peso de cada uno de estos componentes, es la siguiente:

- Ecuación final en término de componentes reales

$$\begin{aligned} \text{Durabilidad} = & -37008,71 \times \text{Aglomerante} + 126,77 \times \text{Biomasa} + 302,91 \times \text{Carbón} \\ & + 61782,84 \times \text{Aglomerante} \times \text{Biomasa} + 61713,4 \times \text{Aglomerante} \\ & \times \text{Carbón} - 247,19 \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} - 53997,3 \times \text{Aglomerante} \\ & \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} + 26074,8 \times \text{Aglomerante} \times \text{Biomasa} \\ & \times (\text{Aglomerante} - \text{Biomasa}) + 28200,01 \times \text{Aglomerante} \times \text{Carbón} \\ & \times (\text{Aglomerante} - \text{Carbón}) + 116,200 \times \text{Biomasa} \times \text{Carbón} \times (\text{Biomasa} \\ & - \text{Carbón}) \end{aligned}$$

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9(2015)*

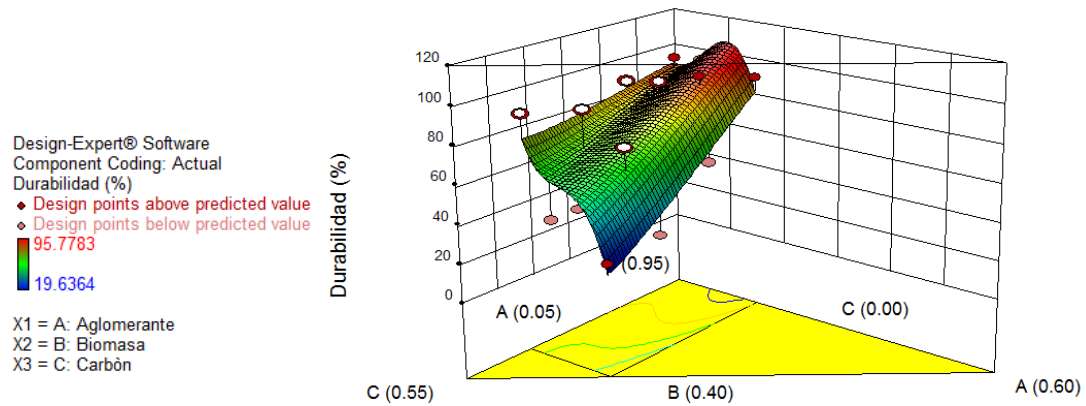
En el Anexo E3, se puede apreciar que el modelo de regresión tiene un coeficiente de determinación de 0,8 indicando que se predicen los valores experimentales con una buena aproximación.

### 3.6.2.2.2 Análisis de superficie de respuesta para la durabilidad mecánica

En los gráficos 14 y 15 se observa como influye la interacción de los 3 factores (biomasa, carbon, aglomerante) en la durabilidad mecánica de las briquetas a base de residuos de algodón, observándose que las durabilidades más altas se obtienen con altos contenidos de biomasa en la mezcla, pero no superiores a 85%, porcentaje con el cual se consigue el mayor valor de durabilidad en las briquetas.

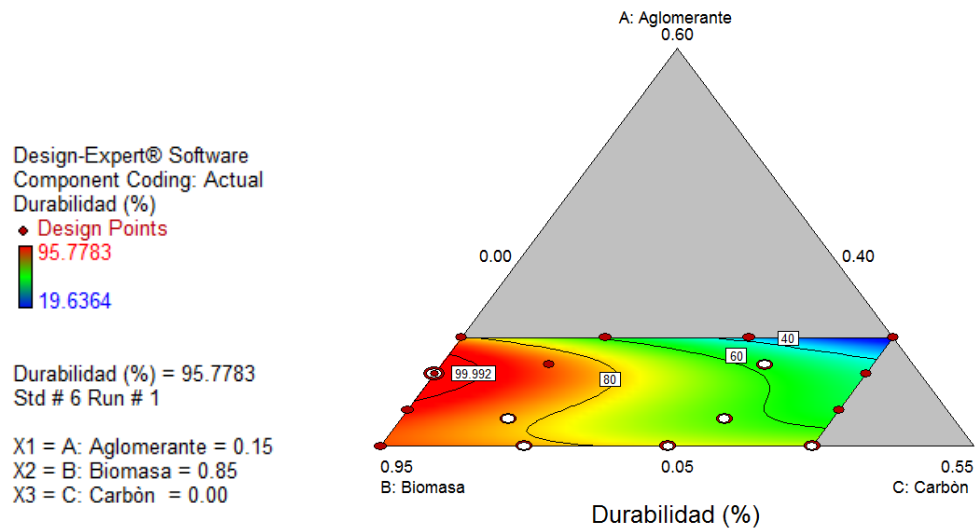
Es posible obtener briquetas durables en casi todo el rango de estudio del aglomerante (entre 5 y 20%), es decir, se pueden obtener densificados con durabilidad aceptable

(>90%), usando porcentajes de aglomerante en la mezcla entre 7 y 19%. Sin embargo, esto solo se consigue utilizando contenidos de carbón inferiores a 10% y contenidos de biomasa superiores a 75%.



**Gráfico 14:** Superficie de respuesta para la durabilidad en briquetas de residuo de algodón

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*



**Gráfico 15:** Gráfico de contorno para la durabilidad en briquetas de residuo de algodón

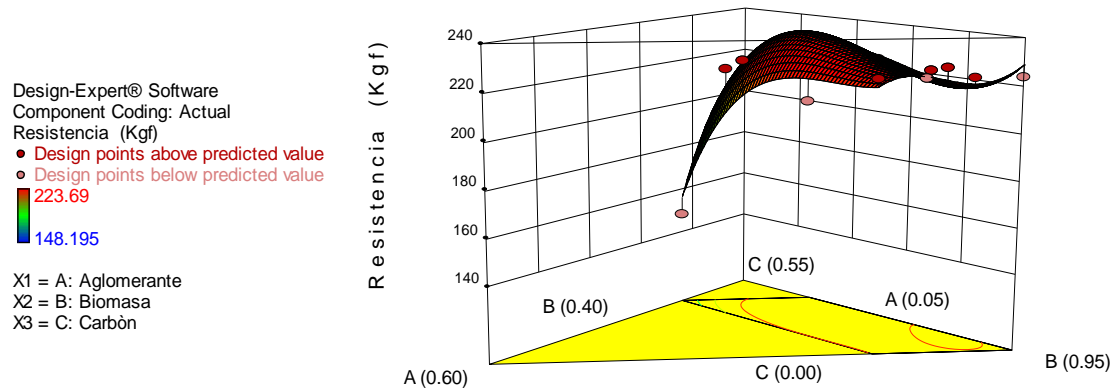
*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

### 3.6.2.2.3 Superficie de respuesta para la resistencia a la compresión

En el gráfico de superficie de respuesta, se ve que todas las posibles mezclas cuentan con una resistencia aceptable respecto a la norma, pues la resistencia mínima que puede

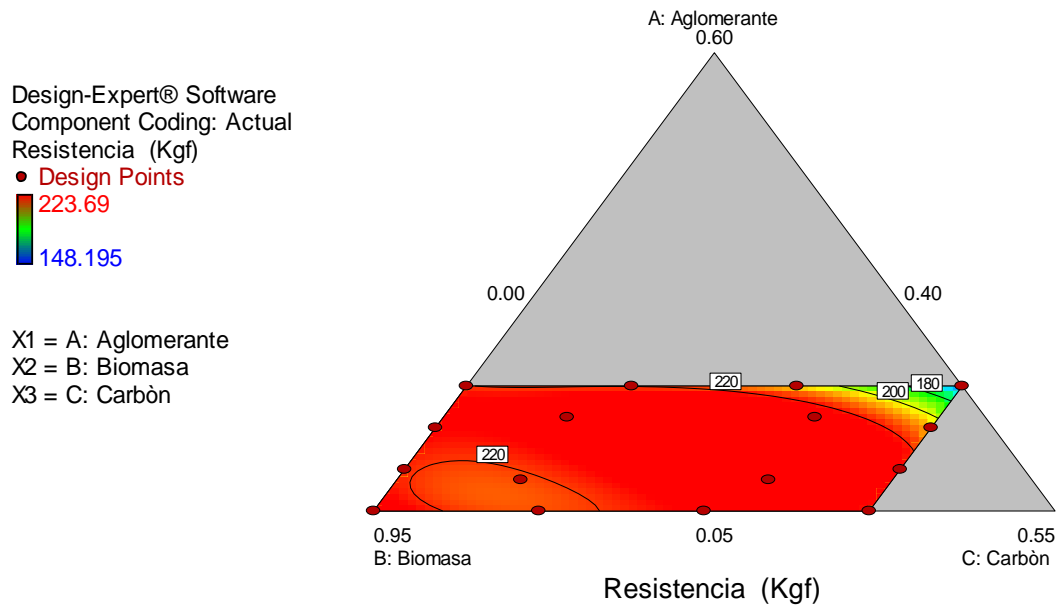


obtenerse a partir de las mezclas es de 148,2 Kgf, muy por encima del valor de 70Kgf requerido para briquetas de 50 g según la norma técnica NTC-2060.



**Gráfico 16:** Superficie de respuesta para la resistencia en briquetas de residuo de algodón

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*



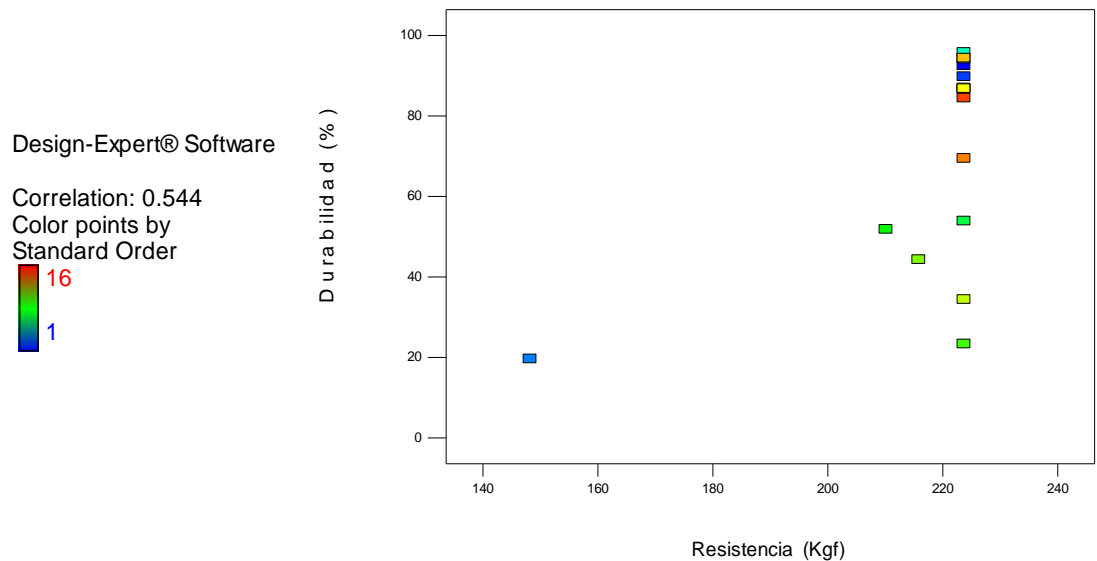
**Gráfico 17:** Gráfico de contorno para la resistencia en briquetas de residuo de algodón

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

#### 3.6.2.2.4 Relación entre la durabilidad y resistencia a la compresión

En la siguiente gráfica, se advierte que no hay una relación entre la durabilidad y la resistencia a la compresión de las briquetas a base de residuos de cosechas de algodón,

resultado que concuerda con una baja correlación obtenida de 0,544. De esta manera, todas las briquetas presentaron resistencias aceptables, pero no todas resultaron ser durables (durabilidad > 90%).



**Gráfico 18:** Durabilidad Vs Resistencia en briquetas de residuo de algodón

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

#### 3.6.2.2.5 Mezclas óptimas(Residuo de algodón)

Se estableció maximizar el contenido de aglomerante en la mezcla, ya que como se vió en el análisis de superficie de respuesta, los mejores resultados de durabilidad se obtuvieron con contenidos de aglomerante, cercanos al 15 %, lo que constituye un alto porcentaje de aglomerante, respecto al rango estudiado de este factor. Así mismo, se maximizó el contenido de biomasa.

Por su parte, se maximiza el contenido de carbón en la mezcla, procurando aumentar el poder calorífico de la mezcla, sin sobrepasar el límite normativo del porcentaje de azufre, de modo que, el contenido de azufre se minimiza.

Por último, se fijó la deseabilidad de la durabilidad y la resistencia en rangos de valores que garantizaron briquetas de calidad según la normatividad (Ver tabla 10-a).

**Tabla 10:** (a) Parámetros de optimización (b) Mézclas óptimas*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)***(a)**

		<b>Lower</b>	<b>Upper</b>	<b>Lower</b>	<b>Upper</b>	
<b>Name</b>	<b>Goal</b>	<b>Limit</b>	<b>Limit</b>	<b>Weight</b>	<b>Weight</b>	<b>Importance</b>
A: Aglomerante	Maximize	0,05	0,2	1	1	3
B: Biomasa	Maximize	0,4	0,95	1	1	3
C: Carbón	Maximize	0	0,4	1	1	3
Durabilidad	Is in range	90	95,78	1	1	3
Resistencia	Is in range	148,2	223,7	1	1	3
Poder Calorífico	Maximize	16,4	19,9	1	1	3
% Azufre	Minimize	0,16	0,73	1	1	3

**(b)**

<b>Solutions</b>									
<b>Number</b>	<b>%Agl.</b>	<b>% Biomasa</b>	<b>%Carbón</b>	<b>Durabilidad (%)</b>	<b>Resistencia (Kgf)</b>	<b>Poder Calorífico (MJ/Kg)</b>	<b>% azufre</b>	<b>Deseabilidad</b>	
1	0,12	0,78	0,09	90	223,7	17,6	0,3	0,4	<b>Selected</b>
2	0,12	0,8	0,09	90	222,5	17,6	0,3	0,39	
3	0,18	0,78	0,04	90	223,7	16,8	0,22	0,25	
4	0,09	0,91	0,0	93,33	221,1	17,23	0,18	0,00	

Según los criterios planteados, se lograron hallar 4 posibles soluciones. El software recomienda seleccionar la mezcla número 1, debido a un mayor poder calorífico de 17,55 MJ/kg y valores aceptables en sus propiedades mecánicas, sin embargo, observando la mezcla número 4, se aprecia que pese a no tener contenido de carbón en su mezcla, conserva un poder calorífico de 17,23MJ/kg, cercano al de la solución número 1. También se puede ver que el valor de durabilidad más alto se consiguió en la mezcla que no contiene carbón (Mezcla 4), con un valor de 93,34%, mientras que en las otras 3 mezclas resultantes de la optimización, las cuales contienen carbón, la durabilidad se mantuvo en el límite inferior de aceptabilidad, con un valor de 90%.

Asimismo, se pudo encontrar que no es posible elaborar briquetas con residuo de algodón y carbón mineral que obtuvieran un poder calorífico superior a 17,9 MJ/kg de la biomasa pura y una durabilidad aceptable. Por esta razón, el criterio de este estudio que

consiste en un mejoramiento del potencial energético para las briquetas hechas con residuo de algodón, no se cumple.

En conclusión, se definió la mezcla 4 como óptima, a pesar de no lograrse una mejora en el potencial energético de la briqueta respecto a la biomasa pura, debido a que obtuvo buena resistencia a la compresión y el valor más alto de durabilidad, además del porcentaje de azufre más bajo de las mezclas, con un valor de 0,18%.

### **3.6.2.3 Cascarilla de arroz**

Se concluye, que no fue posible desarrollar briquetas durables y resistentes, a partir de la cascarilla de arroz, como se observa en la sección 3.5.

#### **4 CONCLUSIONES**

Se lograron elaborar biocombustibles sólidos densificados (briquetas), a partir de tres biomásas residuales agroindustriales, aglomerante de yuca y carbón mineral.

Fue necesario trabajar con un rango de partícula menor ( $<1,18$  mm), al recomendado en investigaciones relacionadas ( $< 3$ mm), debido a que inicialmente no se obtuvieron resultados satisfactorios, bajo las condiciones del aglomerante y la máquina briquetadora diseñada.

Es indistinto utilizar el aglomerante de Yuca, Maíz o Plátano, según los resultados de las pruebas mecánicas realizadas.

La máquina briquetadora diseñada, ofrece una ventaja respecto a otros tipos de briquetado manual, y es que se pueden obtener buenas briquetas, con un tiempo reducido de aplicación de la carga (10-15 min), a diferencia de otros equipos manuales, que necesitan mucho más de una hora de sostenimiento de la presión.

Fue posible obtener buenas propiedades de durabilidad mecánica ( $>90\%$ ) y resistencia a la compresión ( $>70$  Kgf), en briquetas con tusa de maíz y residuo de algodón, sin embargo, no se lograron estos resultados con la cascarilla de arroz.

De manera general, el carbón mineral actúa como un factor disociador en las mezclas, reduciendo considerablemente la durabilidad y resistencia a la compresión en las briquetas.

El 37,5 % de las mezclas de tusa de maíz, obtuvieron una durabilidad superior al 90% y el 75% una resistencia a la compresión mayor a 70Kgf. En las briquetas hechas con residuo de algodón solo el 31,25% de las mezclas superaron el humbral de 90%, sin embargo el 100% superó una resistencia a la compresión de 70Kgf. La cascarilla de arroz tuvo los peores resultados en las dos pruebas, ya que el valor máximo de durabilidad fue de 3,32% y el 37,5% de las mezclas una resistencia a la compresión de 70 Kgf.

No es posible obtener briquetas durables con tusa de maíz, utilizando porcentajes superiores a 32 % de carbón mineral y 18 % de aglomerante en la mezcla.

El uso del carbón para conseguir briquetas a base de residuo de algodón, durables y resistentes, se limita hasta solo un 9,4% en el contenido de la mezcla, de este valor en adelante, no es posible obtener briquetas durables a base de residuos de algodón, sumado al hecho, de que el aporte energético del carbón bajo estos porcentajes no es significativo, considerando que la mezcla tiene altos porcentajes de aglomerante y en conclusión, no es representativo el uso del carbón para elaborar briquetas a base de residuo de algodón.

Se encontraron las mezclas óptimas, para briquetas a base de tusa de maíz, con porcentaje de aglomerante de 5%, biomasa de 68 a 71% y carbón mineral de 24 a 27%, así mismo, se logró aumentar el poder calorífico de la briqueta hasta en un 11,85%

respecto al de la biomasa pura, conservando buenas propiedades de durabilidad y resistencia a la compresión, además de un porcentaje de azufre de 0,3%.

Para las briquetas a base de residuos de algodón, se definió como óptima la mezcla con porcentaje de aglomerante de 9% y biomasa de 91%, obteniendo una resistencia a la compresión de 221 Kgf, una durabilidad de 93,3% y el porcentaje de azufre más bajo de las posibles soluciones con un valor de 0,18%, debido a la ausencia de carbón mineral en la mezcla, ya que con la inclusión de este no se logró una mejora en el potencial energético de la briqueta respecto a la biomasa pura, además de ser el factor que disminuye las propiedades mecánicas del densificado.

## 5 RECOMENDACIONES

En el proceso de elaboración de las briquetas, intervienen variables que no pueden ser controladas, como la humedad relativa y la temperatura ambiente, de esta manera, es posible que al realizar el mismo experimento bajo otras condiciones de humedad y temperatura, se tenga un efecto sobre el procedimiento y se obtengan resultados diferentes.

Se aconseja, utilizar granulometrías reducidas ( $<1,18$  mm), para la elaboración de briquetas con equipos artesanales (bajas presiones) y semi-industriales (presiones medias).

Con la cascarilla de arroz, no se logran buenos resultados en las pruebas mecánicas, sin embargo, se recomienda hacer mezclas con otro tipo de biomásas, utilizar otro tipo de aglomerante y mayores presiones de compactación, para mejorar los resultados.

Otro aspecto importante va dirigido a futuras investigaciones, en las cuales se recomienda determinar el poder calorífico experimentalmente, para obtener datos más precisos en cuanto a las propiedades energéticas de las mezclas.

A fin de mejorar la compactación de las briquetas se recomienda también, realizar el proceso de briquetado a altas temperaturas, ya que las biomásas son elementos lignocelulósicos. Las altas temperaturas causan un reblandecimiento de la lignina en este tipo de materiales, de manera que actúa como un aglomerante natural mejorando la compactación (Ortíz et al. 2004)



## 6 BIBLIOGRAFÍA.

Bhattacharya, S. (2002). Biomass energy and densification: A global review with emphasis on developing countries. *Proceedings of the First World Conference on Pellets*, 1-17.

Caro, A. R. (2010). *RECURSOS NATURALES E INFRAESTRUCTURA " Puntos de Conflicto de la Cooperacion e Integracion Energetica en America latina y el caribe"*. Santiago De Chile.

Augusto Estrada, C., Meneses, Z., & Alberto. (2004). *GASIFICACIÓN DE BIOMASA PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE BAJO PODER CALORÍFICO Y SU UTILIZACIÓN EN GENERACIÓN DE POTENCIA Y CALOR* . Holanda.

Caro, A. R. (2010). *RECURSOS NATURALES E INFRAESTRUCTURA " Puntos de Conflicto de la Cooperacion e Integracion Energetica en America latina y el caribe"*. Santiago De Chile.

Cuevas, I., & Castillo, I. (2012). *Poder Calorífico De Residuos Agrícolas*. Universidad Politécnica De Zacatecas.

Edison, F. C., & Fernando, T. T. (2011). *"DESARROLLO DE UN PROCESO TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ, Y PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE GAS POBRE"*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO , RIOBAMBA-ECUADOR.

Energía, M. D., & (UPME), U. d. (2006). *La Cadena Del Carbón*.

Ivanova, T., Kolarikova, M., Havrland, B., & Passian, L. (2014). Mechanical durability of briquettes made of energy crops and wood residues. *Engineering for rural development*, 131-136.

Perfetti, J., Balcázar, A., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia*. Fedesarrollo; SAC.

Wamukonya, L., & Jenkins, B. (1995). Durability and relaxation of sawdust and wheat-straw briquettes as possible fuels for Kenya. *Pergamon*, 175-179.

Zhang, J., & Guo, Y. (2014). Physical properties of solid fuel briquettes made from Caragana. *Elsevier*, 293-299.

ESPECTADOR, E. (2014, Mayo 5). EL ESPECTADOR. *Colombia tiene reservas de petróleo para 6,6 años y de gas para 15,5 años*.

Fernández, J. (2004). Energía de la biomasa: *La Energía En Sus Claves*, Madrid, Fundación Iberdrola, 397-445.

Gazzoni, D. L. (2009). *Biocombustibles y alimentos en América Latina y el Caribe*. Costa Rica.

Guinó Cruz , A., & Vila Cullerés, E. (Mayo 2011). *Mercado de petróleo. "Análisis económico y perspectivas futuras "*.

Ivanova, T., Kolarikova, M., Havrland, B., & Passian, L. (2014). Mechanical durability of briquettes made of energy crops and wood residues. *Engineering for rural development*, 131-136.

Kaliyan, N. (Marzo,2008.). *Densification of Biomass: Mechanisms, Models, and Experiments on Briquettingand Pelleting of Biomass*.

Martín, F. M. (2005). Pélets y briquetas. *Ecología*, 54-62.

Ortíz, L., Tejada, A., Vázquez, A., & Veiras, G. P. (2004). Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. *CIS-Madera, Universidad de Pontevedra*.

Sánchez, J. P. (2012). *Los Bosques como sistema de Bioalmacenamiento y Bioenergía*. Universidad de Oviedo.

Soto, G., & Núñez, M. (2008). Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de *pinus radiata* (D. don), como material aglomerante. *Maderas.Ciencia Y Tecnología*, 10(2), 129-137.

Stolarski, M. J., Szczukowski, S., Tworkowski, J., Krzyżaniak, M., Gulczyński, P., & Mleczek, M. (2013). Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass. *Renewable Energy*, 57(0), 20-26. doi:<http://dx.doi.org.ezproxy.unal.edu.co/10.1016/j.renene.2013.01.005>.

Tabil Lope, A. P. (2012). *Biomass Feedstock Pre-Processing: Densification*. Canadá

Temmerman, M., Rabier, F., Jensen, P. D., Hartmann, H., & Böhm, T. (2006). Comparative study of durability test methods for pellets and briquettes. *Biomass and Bioenergy*, 30(11), 964-972

Torres, L. O. (2008). *Producción De Biocombustibles Sólidos De Alta Densidad En España*. Universidad de Vigo.

- Tumuluru, J. S., Wright, C. T., Kenny, K. L., & Hess, J. R. (2010). *A Review on Biomass  
Densification Technologies for Energy Application*. Idaho National Laboratory
- Augusto Estrada, C., Meneses, Z., & Alberto. (2004). *GASIFICACIÓN DE BIOMASA  
PARA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES DE BAJO PODER CALORÍFICO  
Y SU UTILIZACIÓN EN GENERACIÓN DE POTENCIA Y CALOR*. Holanda.
- Caro, A. R. (2010). *RECURSOS NATURALES E INFRAESTRUCTURA " Puntos de  
Conflicto de la Cooperacion e Integracion Energetica en America latina y el  
caribe"*. Santiago De Chile.
- Cuevas, I., & Castillo, I. (2012). *Poder Calorífico De Residuos Agrícolas*. Universidad  
Politécnica De Zacatecas.
- Edison, F. C., & Fernando, T. T. (2011). *"DESARROLLO DE UN PROCESO  
TECNOLÓGICO PARA LA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS DE ASERRÍN DE  
MADERA Y CASCARILLA DE ARROZ, Y PRUEBAS DE PRODUCCIÓN DE  
GAS POBRE"*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO ,  
RIOBAMBA-ECUADOR.
- Energía, M. D., & (UPME), U. d. (2006). *La Cadena Del Carbón*.
- Ivanova, T., Kolarikova, M., Havrland, B., & Passian, L. (2014). Mechanical durability  
of briquettes made of energy crops and wood residues. *Engineering for rural  
development*, 131-136.
- Perfetti, J., Balcázar, A., Hernández, A., & Leibovich, J. (2013). *Políticas para el  
desarrollo de la agricultura en Colombia*. Fedesarrollo; SAC.
- Wamukonya, L., & Jenkins, B. (1995). Durability and relaxation of sawdust and wheat-  
straw briquettes as possible fuels for Kenya. *Pergamon*, 175-179.
- Zhang, J., & Guo, Y. (2014). Physical properties of solid fuel briquettes made from  
Caragana. *Elsevier*, 293-299.

## ANEXOS

### ANEXO A – SELECCIÓN DEL MEJOR AGLOMERANTE.



(a) Aglomerante de yuca      (b) Aglomerante de maíz      (c) Aglomerante de plátano

**Figura 21:** Briquetas de algodón: (a) Aglomerante de yuca, (b) Aglomerante de maíz, (c) Aglomerante de plátano

*Fuente: Autores, (2015).*

#### A1- Prueba de durabilidad mecánica



**Figura 22:** Prueba de durabilidad mecánica para Aglomerante de yuca.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 23:** Prueba de durabilidad mecánica para Aglomerante de Maíz.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 24:** Prueba de durabilidad mecánica para Aglomerante de platano.

*Fuente: Autores, (2015).*

## A2- Prueba de resistencia a la compresión



**Figura 25:** Briquetas para prueba de resistencia a la compresión.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 26:** Prueba de resistencia a la compresión para aglomerante de maíz.

*Fuente: Autores, (2015)*



**Figura 27:** Prueba de resistencia a la compresión para aglomerante de plátano.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 28:** Prueba de resistencia a la compresión para aglomerante de yuca.

*Fuente: Autores, (2015).*

## ANEXOS B -PRUEBA DE DURABILIDAD MECÁNICA

**B1-Durabilidad mecánica en briquetas de tusa de maíz, carbón mineral y aglomerante de yuca.**



**Figura 29:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T1.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 30:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T2.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 31:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T3.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 32:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T4.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 33:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T5.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 34:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T6.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 35:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T7.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 36:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T8.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 37:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T9.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 38:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T10.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 39:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T11.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 40:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T12.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 41:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T13.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 42:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T14

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 43:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T15

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 44:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T16.

*Fuente: Autores, (2015).*

**B2-Durabilidad mecánica en briquetas de tusa de algodón, carbón mineral y aglomerante de yuca.**



**Figura 45:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A1.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 46:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A2.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 47:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla T3.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 48:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A4.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 49:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A5

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 50:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A6.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 51:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A7.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 52:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A8.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 53:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A9.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 54:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A10.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 55:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A11.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 56:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A12.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 57:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A13.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 58:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A14.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 59:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A15.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 60:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla A16.

*Fuente: Autores, (2015).*

**B3-Durabilidad mecánica en briquetas de cascarilla de arroz, carbón mineral y aglomerante de maíz.**



**Figura 61:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C1.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 62:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C2.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 63:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C3.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 64:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C4.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 65:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C5.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 66:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C6.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 67:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C7.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 68:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C8.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 69:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C9

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 70:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C10.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 71:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C11.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 72:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C12.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 73:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C13.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 74:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C14.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 75:** Prueba de durabilidad mecánica de la mezcla C16.

*Fuente: Autores, (2015).*

## **ANEXOS C-PRUEBA DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

**C1-** Prueba de resistencia mecánica para briquetas de tusa de maíz, carbón mineral y aglomerante de maíz.



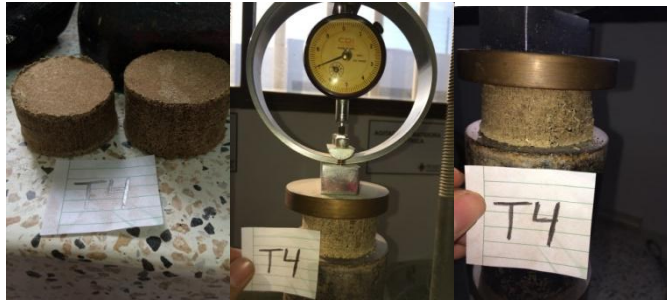
**Figura 76:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T1.

*Fuente: Autores, (2015).*



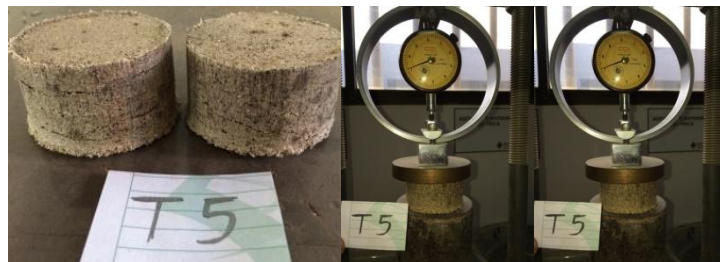
**Figura 77:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T2.

*Fuente: Autores, (2015).*



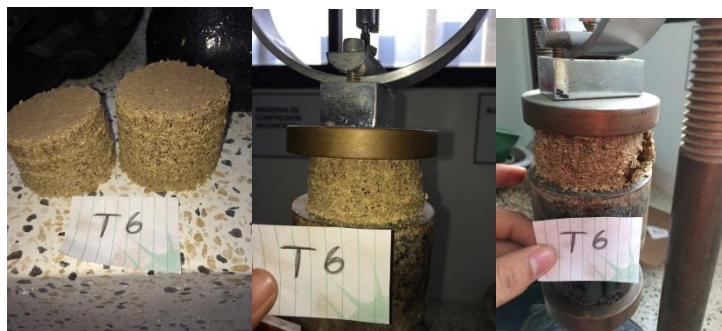
**Figura 78:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T4.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 79:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T5.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 80:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T6.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 81:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T7.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 82:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T8.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 83:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T9.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 84:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T10.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 85:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T11.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 86:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T12.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 87:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T13.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 88:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T14.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 89:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T15.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 90:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla T16.

*Fuente: Autores, (2015).*

**C2-** Prueba de resistencia mecánica para briquetas de residuo de algodón, carbón mineral y aglomerante de yuca.



**Figura 91:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A1.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 92:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A2.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 93:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A3.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 94:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A4.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 95:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A5.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 96:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A6.

*Fuente: Autores, (2015).*



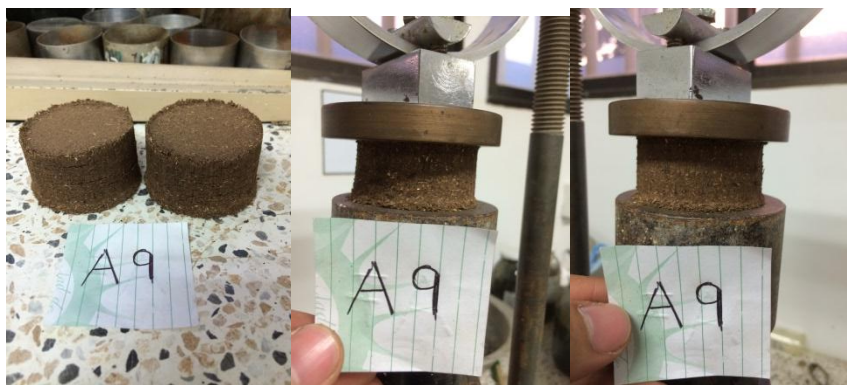
**Figura 97:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A7.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 98:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A8.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 99:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A9.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 100:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A10.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 101:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A11.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 102:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A12.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 103:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A13.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 104:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A14.

*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 105:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A15.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 106:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla A16.

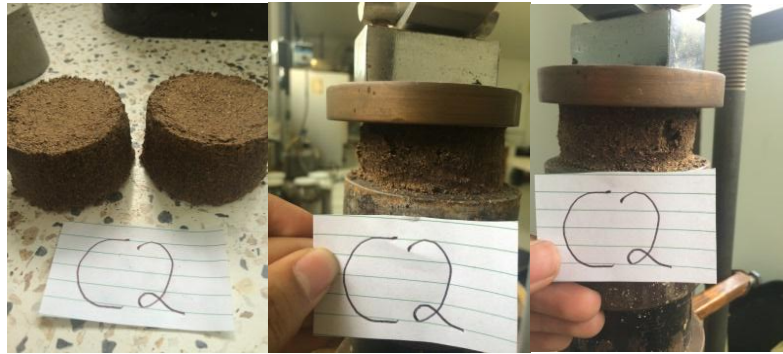
*Fuente: Autores, (2015).*

**C3-** Prueba de resistencia mecánica para briquetas de cascarilla de arroz, carbón mineral y aglomerante de yuca.



**Figura 107:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C1.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 108:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C2.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 109:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C3.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 110:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C4.

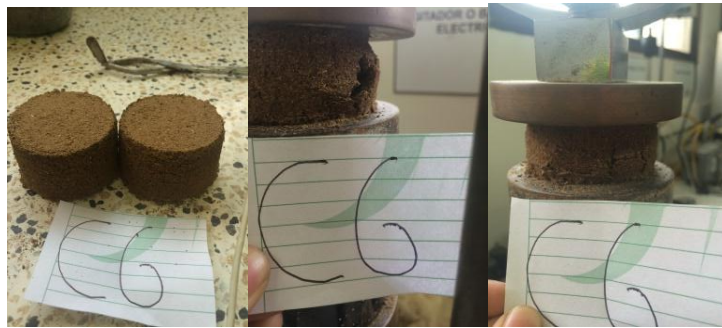
*Fuente: Autores, (2015).*





**Figura 111:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C5.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 112:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C6.

*Fuente: Autores, (2015).*



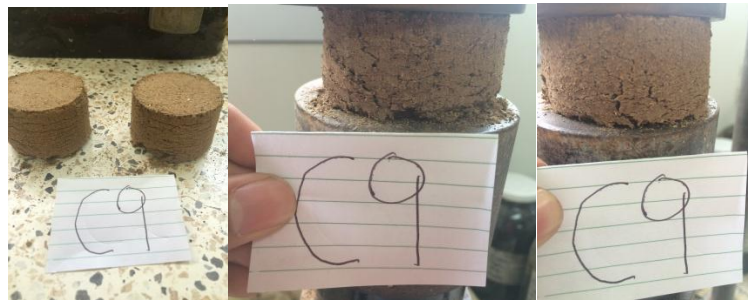
**Figura 113:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C7.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 114:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C8.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 115:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C9.

*Fuente: Autores, (2015).*



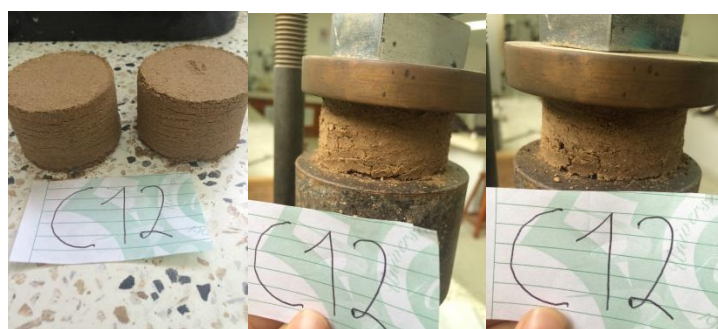
**Figura 116:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C10.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 117:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C11

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 118:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C12.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 119:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C13.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 120:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C14.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 121:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C15.

*Fuente: Autores, (2015).*



**Figura 122:** Prueba de resistencia a la compresión de la mezcla C16.

*Fuente: Autores, (2015).*



## ANEXOS D– RESULTADOS DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA

### D1 - Tusa de maíz

**Tabla 11:** Resultado de las variables de respuesta (Tusa de maíz).

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

Mezclas	Poder calorífico (MJ/Kg)	Azufre (%)	Durabilidad (%)	Resistencia (Kgf)
T1	15.04609176	0.0765	95.77498504	223.69
T2	16.91633152	0.461333333	8.557135334	25.52809873
T3	18.5433296	0.665	29.22181652	90.185
T4	17.80739578	0.520125	77.20242098	215.22
T5	17.74658536	0.474833333	94.75982533	223.69
T6	15.842836	0.266666667	42.87720194	189.635
T7	15.32284304	0.081	97.30274203	223.69
T8	17.39226886	0.513375	37.54214626	36.35
T9	16.1971525	0.228125	91.1164205	223.69
T10	17.98982704	0.656	7.067961165	13.41482767
T11	18.26657832	0.6605	17.43947971	6.514174167
T12	15.59959432	0.0855	95.95137421	223.69
T13	15.78202558	0.221375	83.37471917	132.875
T14	18.82008088	0.6695	78.21241259	204.26
T15	14.76934048	0.072	69.57106196	86.875
T16	16.67308984	0.280166667	96.92719486	223.69

**D2- Residuo de algodón**

**Tabla 12:** Resultado de las variables de respuesta (Algodón).

*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

<b>Mezcla</b>	<b>Poder calorífico (MJ/Kg)</b>	<b>Azufre (%)</b>	<b>Durabilidad (%)</b>	<b>Resistencia ( Kg)</b>
A1	16.76854128	0.17	95.77827155	223.69
A2	17.99708416	0.52	23.35261569	223.69
A3	19.5565352	0.72	34.40460081	223.69
A4	19.04857264	0.5875	84.46193062	223.69
A5	19.13129968	0.55	53.89674449	223.69
A6	17.1937768	0.34	51.83754827	210.115
A7	17.14661312	0.18	94.15250447	223.69
A8	18.48146488	0.5725	69.46151066	223.69
A9	17.8436116	0.3175	86.80445151	223.69
A10	18.80039152	0.7	19.63641052	148.195
A11	19.17846336	0.71	44.31777271	215.83
A12	17.52468496	0.19	92.49689721	223.69
A13	17.27650384	0.3025	94.39083233	223.69
A14	19.93460704	0.73	86.64984642	223.69
A15	16.39046944	0.16	89.77243672	223.69
A16	18.32799232	0.37	86.95797944	223.69

### D3- Cascarilla de arroz

**Tabla 13:** Resultado de las variables de respuesta (Cascarilla de arroz).

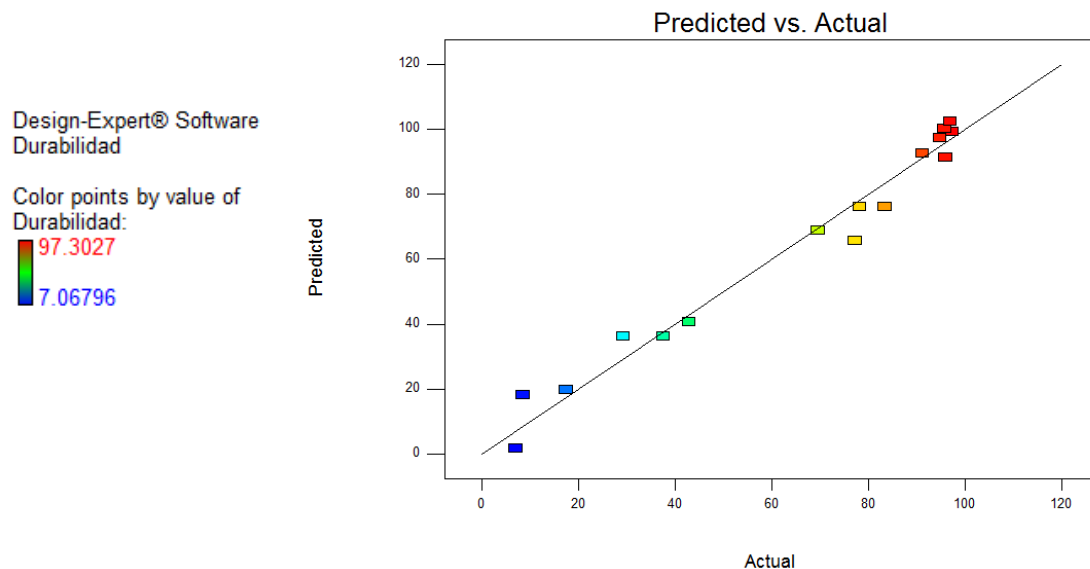
*Fuente: Autores, Design Expert Versión 9 (2015)*

Mezcla	Poder calorifico (MJ/Kg)	Azufre (%)	Durabilidad (%)	Resistencia (Kgf)
C1	14.99271006	0.085	3.317365269	45.225
C2	16.88283712	0.466666667	0	52.84
C3	18.5119286	0.67	1.166685919	60.43
C4	17.76892956	0.52625	0	80.595
C5	17.70367066	0.481666667	0	73.035
C6	15.800968	0.273333333	0	42.685
C7	15.26632124	0.09	0	176.16
C8	17.35851279	0.51875	0	33.795
C9	16.14612588	0.23625	0	69.265
C10	17.96470624	0.66	0	38.88
C11	18.23831742	0.665	0	31.255
C12	15.53993242	0.095	0	186.02
C13	15.73570911	0.22875	2.276211817	48.4
C14	18.78553978	0.675	0	80.58
C15	14.71909888	0.08	0	24.895
C16	16.62180154	0.288333333	0	223.69

## ANEXOS E – PRECISIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN EXPERIMENTALES

### E1- Precisión del modelo de regresión para la durabilidad de briquetas con tusa de maíz.

Los valores de respuesta predichos por el modelo de regresión para la durabilidad de briquetas con tusa de maíz, se graficaron frente a los valores de durabilidad actuales, y a partir de este resultado se pudo concluir que el modelo ofrece una buena aproximación y predicción de la durabilidad mecánica para briquetas de tusa. Además, mediante la gráfica podemos detectar valores atípicos, es decir, valores o grupo de valores que no se predijeron con mucha precisión.



**Gráfico 19:** Precisión del modelo de regresión para la durabilidad mecánica de briquetas con tusa de maíz.

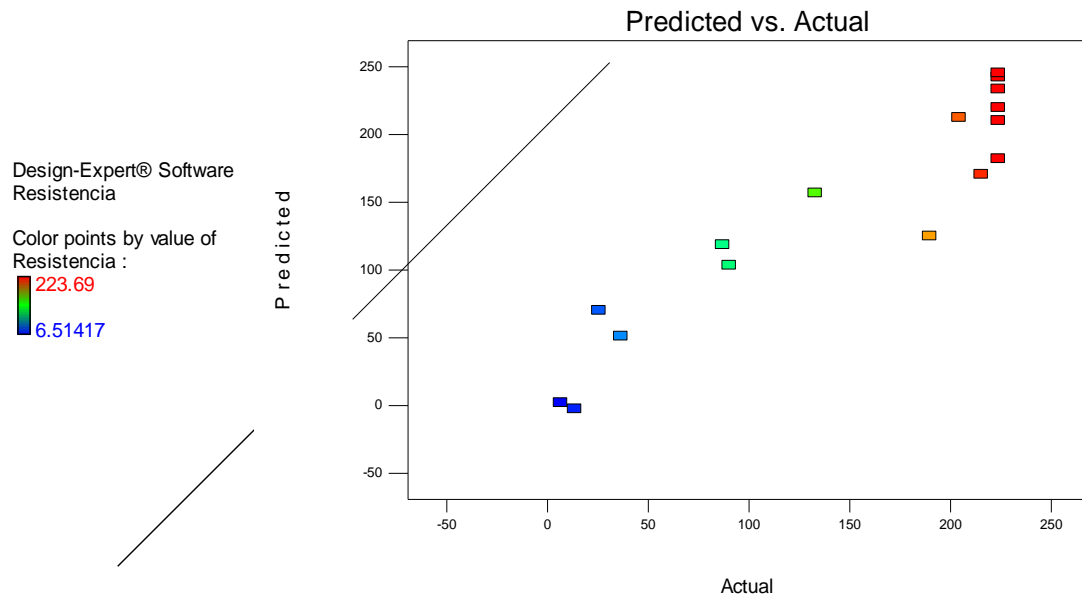
*Fuente: Autores, (2015).*

### E2- Precisión del modelo de regresión para la resistencia a la compresión de briquetas con tusa de maíz.

Los valores de respuesta predichos por el modelo de regresión para la resistencia a la compresión de briquetas con tusa de maíz, se graficaron frente a los valores de respuesta



actuales, y a partir de ese resultado se pudo concluir que el modelo ofrece una aceptable aproximación y predicción de la resistencia a la compresión mecánica para briquetas con tusa de maíz.

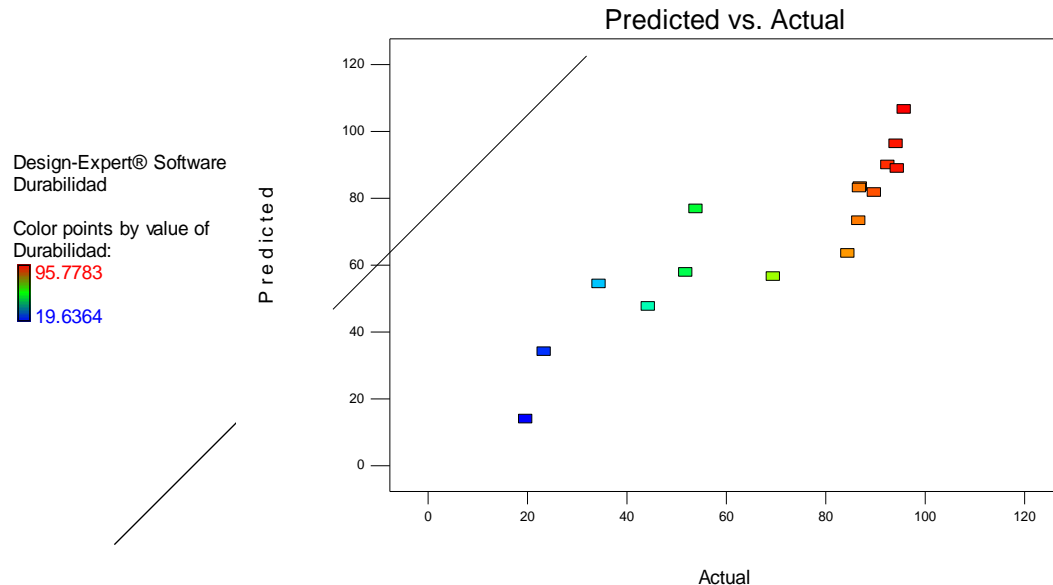


**Gráfico 20:** Precisión del modelo de regresión para la resistencia mecánica de briquetas con tusa de maíz.

*Fuente: Autores, (2015).*

**E3-** Precisión del modelo de regresión para la durabilidad de briquetas con residuo de algodón.

Los valores de respuesta predichos por el modelo de regresión para la durabilidad de briquetas con residuo de algodón, se graficaron frente a los valores de respuesta actuales, y a partir de ese resultado se pudo concluir que a pesar de que hay algunos valores atípicos en la gráfica, el modelo ofrece una relativa buena aproximación y predicción de la durabilidad mecánica para briquetas con residuo de algodón.



**Gráfico 21:** Precisión del modelo de regresión para la durabilidad mecánica de briquetas con residuo de algodón.

*Fuente: Autores, (2015).*

## ANEXOS F– NORMA DE CALIDAD DEL CARBÓN Y SUS MEZCLAS

Según la resolución del ministerio de ambiente (Colombia) 623 de 1998, a partir de las fechas de vigencia indicadas en la Tabla.. , los carbones o sus mezclas que se utilicen en todo el territorio nacional como combustible, deberán cumplir con los requisitos de calidad señalados ( porcentaje de azufre) en la Tabla.. .

**Tabla 14:** Norma de calidad del carbón y sus mezclas.

*Fuente: Resolución 623 del ministerio de ambiente, (1998)*

Contenido de azufre (% peso)				
Región	Vigencia a partir de:			
	Enero 1/1996	Enero 1/1998	Enero 1/2001	Enero 1/2006
Atlántica	1.5	1.2	1	Menor a 1
Central y	1.5	1.2	1	Menor a 1

Orinoquía				
Amazonía	3.8	3.2	2.56	Menor a 1.5

Esta información, fue utilizada para tener un punto de referencia sobre el porcentaje de azufre, y así, poder definir si una briqueta presentaba altos o bajos contenidos de azufre, según las normativas ambientales.

# ANEXO G –CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN (MÁQUINA DE COMPRESIÓN INCONFINADA)



**PINZUAR** LTDA  
LABORATORIO DE METROLOGÍA  
ALTA TECNOLOGÍA CON CALIDAD HUMANA AL SERVICIO DEL MUNDO



## CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN - LABORATORIO DE FUERZA Calibration Certificate - Laboratory of Force

Número: **F- 1889**  
Number

### OBJETO DE PRUEBA:

*Instrument*  
**Rangos**  
*Measurement range*  
**FABRICANTE**  
*Manufacturer*  
**Modelo**  
*Model*  
**Serie**  
*Identification number*  
**Ubicación de la máquina**  
*Location of the machine*  
**Norma de referencia**  
*Norm of used reference*  
**Intervalo calibrado**  
*Calibrated interval*  
**Solicitante**  
*Customer*  
**Dirección**  
*Address*  
**Ciudad**  
*City*

### PATRON(ES) UTILIZADO(S)

*Measurement standard*  
**Tipo / Modelo**  
*Type / Model*  
**Rangos**  
*Measurement range*  
**Fabricante**  
*Manufacturer*  
**No. serie**  
*Identification number*  
**Certificado de calibración**  
*Calibration certification*  
**Incertidumbre de medida**  
*Uncertainty of measurement*  
**Método de calibración**  
*Method of calibration*  
**Unidades de medida**  
*Units of measurement*

### FECHA DE CALIBRACIÓN

*Date of calibration*  
**FECHA DE EXPEDICIÓN**  
*Date of issue*

### MÁQUINA DE ENSAYOS A COMPRESIÓN

223,7 kgf

No Presenta

No Presenta

C. I.: T2594



Laboratorio de Bloques UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA,  
Montería – Córdoba

NTC – ISO 7500 – 1 ( 2007 – 07 – 25 )

Del 10% al 100% del Rango

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

km 6 No. 97 A – 99

Montería – Córdoba

TSTM

5 kN

AEP TRANSDUCERS

801623

INM

0,032 %

Comparación Directa

Sistema Internacional de Unidades ( SI )

2014 – 12 – 10

2015 – 01 – 08

### NÚMERO DE PÁGINAS DEL CERTIFICADO INCLUYENDO ANEXOS

*Number of pages of this certificate and documents attached*

6

### FIRMAS AUTORIZADAS

*Authorized Signature(s)*

  
**Tecg. Víctor Ballesteros**

Director Laboratorio Metrología.

  
**Tecg. Patricia Pinzón**

Aseguradora Laboratorio Metrología.

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido parcialmente excepto cuando se haya obtenido previamente, permiso por escrito del laboratorio que lo emite.

This certificate is an accurate record of the performed measurements results. This certificate must not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory.

Los resultados contenidos en este certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. The results of this certificate refer to the moment and conditions in which the measurements were made.

El Laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos y/o la información contenida en este certificado.

The issuing laboratory assumes no responsibility for any ensuing damages due to the misuse of the calibrated instruments and/or the information of this certificate.

Laboratorios - Calle 18 N° 103 B - 72  
Bogotá, D.C. Colombia

Teléfonos: 4157020 - 5401515

www.pinzuar.com.co  
labmetrologia@pinzuar.com.co

